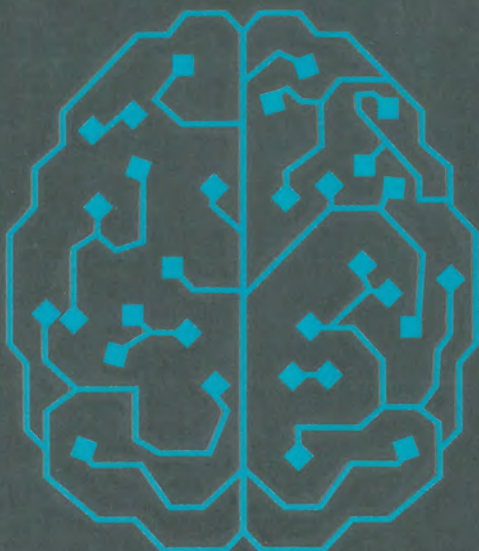


hayatımızdaki [algoritmalar]



günlük kararların
bilgisayar bilimi

Brian Christian
Tom Griffiths



Yayın Numarası: 1707

1. Baskı: Eylül 2017

ISBN 978-605-66858-9-7

Genel Yayın Yönetmeni
Fatih ÖZDEMİR

Çevirmen
Ali ATAV

Editör
Fatih GÜDÜK

Son Okuma
Ahmet Okan ŞEKER

Kapak Uygulama
Halil İbrahim DAĞKILIÇ

Baskı
Ankamat Matbaacılık
13256

Sertifika Numarası: 30821

Buzdağı Yayınevi
Altay Mahallesi 2668. Cadde
Fırat Life Style Rezidans 1F/61
Eryaman/ANKARA

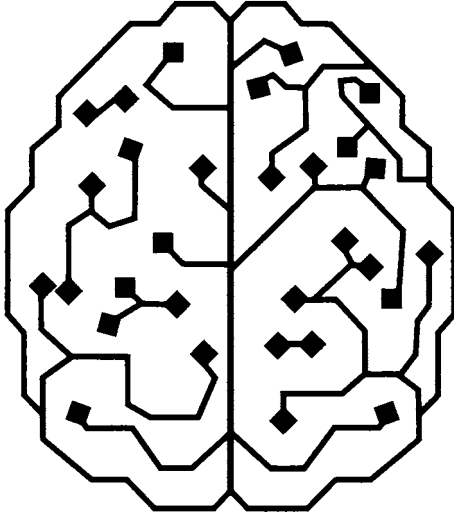
t: +90 0 312 219 77 98
f: +90 0 312 219 55 43
info@buzdagiyayinevi.com
www.buzdagiyayinevi.com

Copyright © 2016
by Brian Christian, Tom Griffiths

© Türkçe yayın hakları
Buzdağı Yayınevi'ne aittir.

Bu kitabın hiçbir bölümü, yazarın
ve yayınevinin izni alınmadan basılı
ya da dijital olarak çoğaltılamaz,
yayınlanamaz.

hayatımızdaki algoritmalar



günlük kararların
bilgisayar bilimi

Brian Christian
Tom Griffiths



İçindekiler

Giriş | 11

Hayatımızdaki Algoritmalar

1. Optimal Duraklama (Optimal Stopping) | 21
Araştırmaya ne zaman son vermeli?
2. Araştır/Kullan (Explore/Exploit) | 51
En yeni mi, En iyi mi?
3. Sıralama (Sorting) | 93
Düzenlemek
4. Önbellekleme (Caching) | 131
Unut Gitsin
5. Çizelgeleme (Scheduling) | 161
İlk Önce Öncelikler
6. Bayes Kuralı | 195
Geleceği Tahmin Etmek
7. Fazla Uyum Sağlama (Overfitting) | 225
Ne Zaman Daha Az Düşünmeli
8. Rahatlama | 253
Bırak Gitsin

9. Rastlantısallık (Randomness) | 271
Ne Zaman Şansa Bırakmalı?
10. İletişim Ağı Yönetimi (Networking) | 303
Nasıl Bağlanırsınız?
11. Oyun Teorisi (Game Theory) | 337
Başkalarının Akılları Nasıl Çalışır?
- Sonuç | 374
Bilişimsel Nezaket

Notlar | 383

Bibliyografya | 466

Teşekkür | 486

Giriş

Hayatımızdaki Algoritmalar

Ev bulmanın tartışmasız en ürkütücü olduğu Amerikan şehri San Francisco’da bir ev aradığınızı düşünün. Bu şehrin patlama yaşayan teknoloji sektörü yüzünden, yeni inşaatları sınırlayan sıkı imar yasalarının şehri New York kadar pahalı olduğu ve hatta birçok alanda onu geçtiği söylenmektedir. Emlakçılarda ev ilanları sürekli asılmakta, asıldığı gibi indirilmekte ve bu evlerin anahtarları depozitoyu ilk verenin elinde kalmaktadır.

Böylesine vahşi bir pazar, teorik olarak rasyonel tüketici (rational consumer) eylemleri olan araştırma ve incelemeye çok az şans tanımaktadır. Karar vermeden önce seçenekleri karşılaştırabilen bir AVM yatırımcısı ya da internette alışveriş yapan birinin aksine San Fransisco’da kiralık ev arayan bir kişi, iki hareket tarzından birini derhâl seçmek zorundadır: O anda bakmakta olduğu apartman dairesini diğer tüm seçeneklerden vazgeçerek tutacaktır ya da bir daha arkasına bakmamak üzere vazgeçip gidecektir.

Durumu biraz basite indirgeyelim ve bir anlığına uygun olan evler içerisinde en iyisini tutma şansınızı maksimize etmeye çalıştığınızı varsayalım. Tuttuğunuz ev ile bakmadıklarınızın “toplam pişmanlıklarını” minimumda tutmayı amaçlamaktası-

nız. Peki, bir evin en iyi olduğunu, buna hüküm verecek bir dayanağınız olmadan nasıl anlarsınız? Ve bu karar tabanını oluşturan esasları bir dizi apartman dairesine bakmadan (ve elden kaçırmadan) nasıl tesis edebilirsiniz? Ne kadar fazla bilgi toplarsanız, bunun farkına o kadar iyi varırsınız ama geçen süre zarfında muhtemelen o fırsatı kaçırmış olursunuz.

O zaman ne yapacaksınız? Bilgiye dayalı bir kararı, bilgi edinmek kararın sonucunu tehlikeye atarken nasıl verirsiniz? Paradoksa yol açmaya çok yakın acımasız bir durumla karşı karşıya kalırsınız.

Birçok insan bu tür bir sorunla karşılaştığında araştırma ile ilk gördüğüne atlama arasında bir denge kurduğunu söyleyecektir. Bir standart oluşturmak adına yeteri kadar eve bakmalısınız ve daha sonra da koyduğunuz standardı karşılayan birini tutmalısınız. Bu denge söylemi aslında tam olarak doğrudur. *Söylenmeyen* şey ise bu dengenin nasıl kurulduğudur. Neyse ki bu sorunun bir cevabı var.

Yüzde 37

Eğer en iyi evi tutmaya dair en iyi olasılıkları elde etmek istiyorsanız ev arayacağınız sürenin yüzde 37'sini (örneğin bir ayınız varsa bunun 11 gününü) tarafsız olarak seçeneklere bakarak geçirin. Kontrol çizelgenizi evde bırakın, sadece bakmaya gittiğinizi düşünün. Bir noktadan sonra en iyiyi gördüğünüz anda taahhüt altına girmeye hazır olun: Hem depozito hem de kiranın tamamı için. Bu sadece seçeneklere bakma ile ilk gördüğünüze atlama arasındaki içgüdüsel bir uzlaşma değildir. İspat edilebilen optimal bir çözümdür.

Bu çözümü “optimal duraklama (optimal stopping)” olarak bilinen bir matematik problemi sınıfına girdiği için biliyoruz. Yüzde 37 Kuralı, bu problemleri çözmek için bilgisayar mühendislerinin “algoritma” dedikleri bir dizi basit adımlar serisini kullanmaktadır. Ve ev aramak, optimal duraklamanın günlük

yaşantımıza burnunu soktuğu alanlardan sadece biridir. Bir dizi seçeneği kabul etmek ya da vazgeçmek yaşamımızda devamlı olarak birbirinden biraz farklı şekilde ortaya çıkan bir durumdur. Bir park yerine aracınızı bırakmadan önce bütün bloğun etrafında kaç kere dönersiniz? Riskli bir işe yatırdığınız parayı ne kadar bekletirsiniz? Evinizi ya da arabanızı satarken daha iyi bir teklif için ne kadar beklersiniz?

Aynı sorun çok daha rahatsız edici bir durumda da ortaya çıkmaktadır: Randevulaşma. Optimal duraklama, aynı zamanda evlilik (serial monogamy) bilimidir.

Basit algoritmalar sadece ev bulmak için değil aynı zamanda optimal duraklama problemiyle karşılaştığımız, yaşamdaki tüm sorunlar için çözümler sunmaktadır. İnsanlar her gün benzer sorunlarla -elbette ki şairler park sorunundan daha çok aşk üzerine mürekkep harcamışlardır- boğuşmaktadır ve bazı durumlarda bu, acı verici bir deneyim hâline dönüşebilir. Aslında burada katlanılan acı gereksizdir. En azından matematiksel olarak bunlar çözümlü problemlerdir.

Etrafınızda gördüğünüz eziyet çeken kiracılar, sürücüler ya da evlenmek isteyen kişiler aslında Amerika'yı yeniden keşfetmektedir. Bir terapist değil bir algoritmaya ihtiyaçları vardır. Terapist onlara detaylı düşünme ile acele karar verme arasındaki uygun dengeyi bulmalarını söyleyecektir.

Algoritma ise onlara dengenin yüzde 37'de olduğunu söyleyecektir.

•

Tüm insanların karşılaştığı birtakım problemler vardır: Yaşamlarımızın sonsuz bir uzay ve zaman içinde devam ediyor olmasının doğrudan bir sonucu olan problemler. Bir gün ya da on yıl içerisinde neleri yapmalıyız ve neleri yapmamalıyız? Hayatımızdaki düzensizliğin kabul derecesi nedir ya da yaşantımızdaki düzenin

ne kadarı bize fazla gelebilir? En tatmin edici yaşam için *yeni* ile *tercih edilen* tecrübeler arasındaki denge nasıl olmalıdır?

Bunlar sadece insanlara has sorunlar gibi görünebilir ancak değildirler. Yarım asırdan daha uzun bir süredir bilgisayar mühendisleri her gün karşımıza çıkan bu açmazlarla boğuşmakta ve çoğunu çözmektedir. Bir işlemci minimum yük ve en kısa sürede kullanıcısının kendisinden istediğini yapmak için “performansını” nasıl kullanılmalıdır? Farklı görevler arasında ne zaman geçiş yapmalı ve ilk olarak kaç adet görev üstlenmelidir? Sınırlı hafıza kaynaklarını kullanmanın en iyi yolu nedir? Daha fazla veri toplamalı mıdır yoksa elindeki mevcut veriye göre mi hareket etmelidir? Anın tadını çıkarmak insanlar için zor olabilir ama etrafımızdaki bilgisayarlar her bir milisaniyenin tadını kolaylıkla çıkarmaktadır. Ve bu başarılarından öğreneceğimiz çok şey vardır.

İnsan yaşamı için algoritmalarından bahsetmek garip görünebilir. Birçok kişi için “algoritma” kelimesi büyük verinin (big data), büyük devletlerin ve dev şirketlerin gizemli ve anlaşılmaz entrikalarını çağrıştırmaktadır: Modern dünya altyapısının gide-rek artan bir şekilde parçası olan ama bir bilgelik kaynağı ya da insanoğlunun rehberi olarak görülmeyen bir kavram. Fakat algoritma, bir problemi çözmek için kullanılan sınırlı adımlar dizisidir ve algoritmalar bilgisayarlardan çok daha eski ve geniş bir anlama sahiptir. Algoritmalar makineler tarafından kullanılmadan çok çok önce insanlar tarafından kullanılmaktaydı.

“Algoritma” kelimesi, matematiksel işlemler üzerine dokuzuncu yüzyılda bir kitap yazan Müslüman-Türk matematikçi Harezmi’den gelmektedir. (Kitabının ismi El’Kitab’ül-Muhtasar fi Hısab’il Cebri ve’l-Mukabele’dir ve el cebir kelimesi bizim bugün kullandığımız cebir kelimesinin kaynağıdır). Fakat bilinen ilk matematiksel algoritmalar Harezmi’nin çalışmalarından da eskiye dayanmaktadır. Bağdat yakınlarında bulunmuş olan 4.000

yıllık Sümer zamanına ait kil tablet uzun bir bölme işlemini göstermektedir. Algoritmalar sadece matematik alanıyla sınırlı değildir. Tarife uygun olarak yemek yaptığınızda bir algoritmayı takip edersiniz. Bir şablona uygun şekilde süveter örüyorsanız, bir algoritmayı takip edersiniz. Taş devrindeki gibi taştan el araçları yapmak için keskin kenarlı taşlarla çalışırken bir algoritmayı takip edersiniz. Algoritmalar taş devrinden bu yana insan teknolojilerinin bir parçası olmuştur.

•

Biz bu kitapta, insanlar için algoritma tasarımını incelemekteyiz. Diğer bir deyişle insanların her gün karşılaştığı zorluklar için daha iyi çözümler arıyoruz. Bilgisayar biliminin gözünden günlük yaşama bakmak farklı ölçekte sonuçlar doğurmaktadır. Bunlardan ilk akla geleni, belirli sorunların nasıl çözüleceğine dair pratik, somut öneriler sunmasıdır. Optimal duraklama bize ne zaman araştırma yapacağımızı ve ne zaman çözüme geçeceğimizi söyler. Araştır ve kullan ödünleşimi (explore and exploit tradeoff) bize yeni şeyler deneme ile beğendiklerimizi tercih etme arasındaki dengeyi nasıl bulacağımızı söyler. Sıralama teorisi (sorting theory) ofislerimizi nasıl düzenleyeceğimizi (ya da düzenlemeyeceğimizi) söyler. Önbelleğe alma teorisi (caching theory) dolaplarımızı nasıl düzenlememizi ve ev düzeninin nasıl olması gerektiğini söyler. Çizelgeleme teorisi (scheduling theory) zamanımızı nasıl planlayacağımızı anlatır.

Bir sonraki seviyede ise bilgisayar bilimi, bu alanlarda mevcut prensipleri daha iyi anlamamız için bize terminoloji desteği sağlar. Carl Sagan'ın da belirttiği gibi; "Bilim, bilginin kendisinden ziyade bir düşünme biçimidir." Rakamsal bir analiz ya da hazır bir cevabı beklediğimiz hayatımızın karmaşık zamanlarında bile bu sorunların daha basit türlerine ilişkin sezgi ve düşüncelerimizi kullanmak, ana sorunları anlama ve ilerleme adına bize bir yol sunar.

Bilgisayar biliminin gözünden bakmak en geniş anlamıyla bize insan zihninin doğası, rasyonel olmanın anlamı ve soruların en eskisi olan “nasıl yaşanacağı” hakkında bir şeyler öğretebilir. Düşünmeyi, çevremiz tarafından sunulan temel bilişim problemlerini çözmenin bir yolu olarak incelemek insan rasyonelliği konusundaki düşünce şeklimizi tamamen değiştirebilir.

Bilgisayarın işleyişi üzerine çalışma, nasıl düşünüleceği ve karar verileceği, neye inanılıp nasıl davranılacağı konularına ışık tutabilir ve insanlar için çarpıcı olabilir. Bilgisayar biliminin nasıl düşünüleceği ve nasıl davranılacağı konusunda bize söyleyecekleri olsa bile, biz onu dinlemek istiyor muyuz? Bilim kurgulardaki robotlara ve yapay zekâlara bakıyoruz ve yaşantılarının bizim isteyeceğimiz yaşam şekli olmadığına kanaat getiriyoruz.

Bunun nedeni kısmen bilgisayarın soğuk, mekanik ve deterministik sistemler olduğunu düşündüğümüz içindir: Katı bir mantığı olan, seçenekleri deneyen yoğun işlemler sonucunda kararlar veren ve ne kadar zor ve uzun olsa da en doğru ve kesin cevabı bulana kadar didinen makineler. Aslında bilgisayarları hayal eden ilk insanın aklında muhtemelen buna benzer bir şey vardı. Alan Turing bilgisayarı, doğru cevaba ulaşmak için uzun hesaplamalar gerektiren adımları hatasız ve dikkatli şekilde izleyen bir matematikçiye benzetmişti.

Bu nedenle modern bilgisayarlar zor bir problemle karşılaştıklarında sonuçlar şaşırtıcı olabilmektedir. Elbette ki sıradan aritmetik, modern bir bilgisayar için zor bir şey ya da engel değildir. Bunların yerine insanlarla konuşmak, bozulmuş bir dosyayı düzeltmek ya da bir Go oyununu kazanmak -kuralların açıkça belli olmadığı, gerekli bazı bilgilerin eksik olduğu ya da doğru cevabı bulmanın astronomik denebilecek kadar çok sayıda seçeneği değerlendirmeyi gerektirdiği sorunlar- bugünlerde bilgisayar bilimindeki büyük zorlukları ifade etmektedir. Ve en zor problem türlerini çözmek için araştırmacıların geliştirmiş olduk-

ları algoritmalar, bilgisayarları çok fazla hesaplamaların yapıldığı alandan uzağa taşımıştır. Bunun yerine gerçek dünyadaki görevlerle ilgilenmek, şans konusunda rahat olmayı, zamana karşılık kesinlikten bir miktar taviz vermeyi ve tahmini kullanmayı gerektirir.

Bilgisayarlar, insanların gerçek yaşam sorunlarına daha iyi uyum sağladıkça sadece insanların kendi hayatlarında kullanabilecekleri algoritmaları sağlamakla kalmaz, aynı zamanda insanların algı ve anlayışlarıyla karşılaştırılacak bir standart sunarlar. Son 10 ila 20 yılda davranışsal ekonomik eğilimler insanlar hakkında çok özel bir hikâye anlatmıştır: İnsanların rasyonel olmadığını ve hataya meyilli olduğunu ve bunun da büyük oranda hatalarla dolu olan beynimizle ilgili olduğunu. Kendi içerisinde çelişen bu hikâye gittikçe yaygınlaşmıştır ama bazı sorular hâlen can sıkımaya devam etmektedir. Örneğin dört yaşındaki bir çocuk görsellik, dil ve nedensel ilişkiler gibi algılamaya ilişkin görevlerde milyon dolarlık bilgisayarlardan neden daha iyidir?

Günlük yaşam sorunlarına bilgisayar bilimleri tarafından sunulan çözümler insan zihni konusunda farklı bir hikâye anlatmaktadır. Hayat, basitçe *zor* problemlerle doludur. Ve insanlar tarafından yapılan hatalar genellikle sorunların iç zorlukları ve insan beyninin yanılabilirliğinden daha fazla şey anlatmaktadır. Dünya hakkında algoritmik bir şekilde düşünmek, karşılaştığımız sorunların temel yapılarını öğrenmemize ve yaptığımız hataları daha iyi anlamamıza yardım edebilir.

Aslında insanlar, bilgisayar mühendisleri tarafından çalışılmış en zor sorun türlerinden bazılarıyla sürekli olarak karşılaşmaktadır. İnsanların genellikle belirsizlik, zaman kısıtları, yetersiz bilgi ve hızla değişen dünya şartları altında karar vermeleri gerekir. Bu durumlardan bazıları hakkında en son bilgisayar teknolojileri bile verimli ve her zaman doğru sonuca ulaşan algorit-

malar geliştirememiştir. Belirli durumlar için ise bu tarz algoritmalar hiç var olmayacakmış gibi gözükmektedir.

Kusursuz algoritmalar henüz bulunmamış olsa bile farklı nesillerden bilgisayar mühendisleriyle en inatçı gerçek dünya sorunları arasındaki savaş, bu konuya biraz olsun ışık tutmuştur. Zor bir şekilde edinilen bu kaideler rasyonellik hakkındaki sezgilerimizle çelişmektedir ve kulağa dünyayı bir düzene sokmaya çalışan matematikçinin görüşleri gibi gelmemektedir. Tüm seçenekleri her zaman değerlendirmeyin derler. Her seferinde en iyi gibi gözüken çözümün peşine düşmeyin. Az eşyayla seyahat edin. Bazı şeyleri bekletin. İçgüdülerinize güvenin ve çok fazla düşünmeyin. Rahatlayın. Affedin ama unutmayın. Kendinize karşı dürüst olun.

Bilgisayar biliminin kaidelerine uygun olarak yaşamak kulağa o kadar da kötü gelmemektedir. Ve birçok tavsiye ya da görüşün aksine kanıtlarla desteklenmektedir.

•

Tıpkı bilgisayarlar için algoritma geliştirmenin ilk başlarda disiplinler arası boşluklara -matematik ve mühendisliğin garip bir melezlenmesi gibi- düşmesi gibi insanlar için algoritmalar tasarlamak da doğal olarak kendine has bir disipline sahip değildir. Algoritma tasarımı günümüzde sadece bilgisayar bilimi, matematik ve mühendislik alanları ile değil, aynı zamanda istatistik ve yöneylem araştırması gibi alanlarla da ilişkilidir. Ve tıpkı makineler için tasarlanmış algoritmaların insan zihniyle nasıl ilişkili olabileceğini düşündüğümüz gibi bilişsel bilim, psikoloji, ekonomi ve bunların ötesine de göz atmamız gerekir.

Kitabınızın yazarları olan bizler disiplinler arası olan bu alana aşinayız. Brian İngilizce üzerine çalışmadan önce bilgisayar bilimi ve felsefe üzerine çalışmıştır. Tom, insan düşünceleri ve bilgisayar bilimi arasındaki ilgi üzerine çalıştığı UC Berkeley’de öğretim elemanı olmadan önce psikoloji ve istatistik çalışmıştır.

Ancak hiç kimse, insanlar için daha iyi algoritmalar tasarlamayla ilişkili bu alanların tümünde uzman olamaz. Bu nedenle hayatımızdaki algoritmalar üzerine arayışımızın bir parçası olarak son 50 yıl içindeki en ünlü algoritmaların bazılarının yaratıcılarıyla konuştuk. Ve dünyadaki en zeki insanlardan bazılarına araştırmalarının kendi yaşamlarına -eş seçimlerinden çorap çekmecelelerini düzenlemeye kadar- yaklaşımlarını nasıl etkilediğini sorduk.

Seyahatimiz, bilgisayar ve insan zihninin karşısına çıkan en zorlu sorunların bazılarıyla başlamaktadır: Sonlu uzayı, sonlu zamanı, sınırlı ilgiyi, bilinmeyen bilinmeyenleri, eksik bilgiyi ve öngörülemeyen geleceği nasıl yönetebiliriz; ve tüm bunları nasıl hoş ve güvenli bir şekilde yapabiliriz; ve diğer kişilerin de aynı şeyi yapmaya çalıştığı bir ortamda tüm bunları nasıl deneyebiliriz. Bu sorunların temel matematiksel yapılarını ve (bazen hayal ettiğimiz tersi olsa da) bilgisayarların nasıl çalıştığını öğreneceğiz. Ayrıca zihnin nasıl çalıştığını ve aynı sorun ve kısıtlarla ilgilenmedeki farklı fakat derinlemesine olan ilişkisini de göreceğiz. Son olarak elde edeceklerimiz etrafımızdaki sorunlara yönelik somut ve hazır yöntemleri öğrenmek, en riskli insani konulardaki ikilemlerin ardındaki karmaşık yapıları görmek, insanların ve bilgisayarların en derinden çektikleri sancıları tanımak değildir sadece. Çok daha derin ve güçlü bir şey daha kazanırız: Etrafımızdaki dünyaya ilişkin yeni bir kelime hazinesi ve kendimiz hakkında gerçekten yeni bir şeyler öğrenme şansı.

1

Optimal Duraklama (Optimal Stopping)

Araştırmaya ne zaman son vermeli?

Tüm Hristiyanlar düğün davetiyelerine evliliklerinin ilahi bir düzenleme olduğunu açıklayarak başlamalarına rağmen ben, bir filozof olarak bu konuda daha detaylı konuşmak istiyorum...

—Johannes KEPLER

Eğer Bay Martin'i dünyadaki hiç kimseye değişmeyecekseniz ve onu eşlik ettiğiniz en makul kişi olarak görüyorsanız; neden tereddüt edersiniz ki?

—Jane AUSTIN, *EMMA*

Üniversitelerde akademik danışmanlık yapanların argo tabirle “hindi atma (turkey drop)” olarak isimlendirdiği yaygın bir olgu vardır. Lisede sevgili olanlar, üniversitedeki ilk yılının Şükran Günü tatilinde memleketlerinde buluşurlar ve dört günlük Şükran Günü tatilinden sonra okullarına geri dönerler.

Daima kendisine endişelenecek bir konu bulan Brian, üniversitesindeki akademik danışmana gitmişti. Lise aşkı birkaç eyalet ötedeki bir üniversiteyi kazanmıştı ve aralarındaki mesafe oldukça fazlaydı. Ayrıca daha felsefi ve yeni bir soru da ka-

fasını kurcalamaktaydı. Ne kadar iyi bir ilişkileri vardı? Bunu kıyaslayacakları bir ölçütleri yoktu. Brian'ın danışmanı bunu klasik bir birinci sınıf üniversite öğrencisi açmazı olarak görmüş ve gayet soğuk bir tavsiyede bulunmuştu: “Kıyaslayacak veri topla.”

Evlenmek için tanışmanın doğası, uygulayıcıların temel ve kaçınılmaz bir problemle karşılaşmasını gerektirmektedir. Doğru eşi bulmak için ne kadar kişiyle tanışmalısınız? Ve bunu sağlayacak olan veriyi elde etme maliyeti nedir?

Genç bir insanın yardım çığlığı attığı bu durum, matematikçilerin “optimal duraklama” adını verdikleri problemdir ve aslında bir cevabı da vardır: Yüzde 37.

Elbette tüm bunlar aşk hakkında yapmak istediğiniz varsayımlara dayanmaktadır.

Sekreter Problemi

Herhangi bir optimal duraklama probleminde en önemli açmaz hangi seçeneğin *seçileceği* değil, kaç tane seçeneğin *dikkate alınacağıdır*. Bu problemlerin sadece sevgililer ve kiracılar için değil aynı zamanda sürücüler, ev sahipleri, hırsızlar vb. kişiler için de uygulamaları vardır.

Yüzde 37 Kuralı* “sekreter problemi” olarak bilinen optimal duraklama problemlerinin en ünlüsünden gelmektedir. Yapısı, daha önceden incelediğimiz ev arayan kişinin açmazıyla aynıdır. Sekreterlik kadrosunda boş olan bir mevki için başvuran kişilerle görüşme yaptığınızı varsayın. Burada amacınız, havuzdaki adaylardan en iyisini seçmektir. Başvuruda bulunan bireyle ri nasıl bir puanlamaya tabi tutacağınıza dair bir fikriniz olmadan hangisini tercih ettiğinize kolay bir şekilde karar verebilirsiniz. (Bir matematikçi puanlamanızın belirli bir ölçeğe bağlı puanla-

* Kitaptaki algoritmaları göstermek için **kalin** yazı karakterleri kullanılmıştır.

madan ziyade adaylar arasında bir sıralama olacağını söyleyecektir). Adaylarla tek tek ve rastgele görüşürsünüz. Herhangi bir anda görüştüğünüz adaya işi teklif edebilirsiniz ve araştırma bu noktada sonlandırılır. Eğer bir aday hakkında kararınız olumsuzsa aday havuzdan çıkmış olur.

Sekreter probleminin basılı olarak ilk defa *Scientific American* dergisinin 1960 sayısında -sekreterlerden açık bir şekilde bahsedilmeden- Martin Gardner'ın yazdığı matematik eğlencesi köşesinde yer aldığı bilinmektedir. Lakin problemin ilk kaynağı şaşırtıcı bir şekilde gizemlidir. Konu hakkındaki ilk araştırmalarımız spekülasyondan başka bir şeyle sonuçlanmamıştı. Fakat sonra beklenmedik şekilde bir dedektif araştırmasına dönüştü. Stanford'da yer alan Gardner'ın yazılarının yanı sıra yarım asırlık mektup destelerini de içeren arşivlere bir yolculuk yaptık. Mektup okumak, yanınızda telefonla konuşan birini dinlemeye benzer. Sadece bir kişiyi duymakta ve diğerinin ne söylediği konusunda çıkarımda bulunmak zorundasınızdır. Bizim elimizde ise sadece Gardner'ın 50 yıl kadar önce problemin kökenine ilişkin kendi araştırmasını yazdığı mektupları vardı. Okumaya devam ettikçe hikâye daha belirsiz ve karmaşık bir hâl almaktaydı.

Harvard'dan matematikçi Frederick Mosteller problemi, 1955 senesinde meslektaş Andrew Gleason'dan duyduğunu hatırlamaktadır. Gleason da bunu bir başka kişiden duymuştur. Alberta Üniversitesi'nden Leo Moser bize, problem hakkında Boeing'den R. E. Gaskell'e ait "bazı notlarda" bir şeyler okuduğunu anlatan bir mektup yazmıştır. Rutgers'dan Roger Pinkham problemi ilk defa 1955 senesinde Duke Üniversitesi'nden matematikçi J. Shoenfield'den duyduğunu söylemiş ve şöyle demiştir: "Onun da bu problemi Michiganlı birinden duyduğunu söylediğini hatırlıyorum."

"Michiganlı biri" neredeyse kesin bir şekilde Merrill Flood isimli kişiydi. Matematik çevreleri dışında ismi pek duyulmamış

olsa da Flood'un bilgisayar bilimine olan etkisi neredeyse gözden kaçırılması imkânsız denebilecek kadar büyüktür. Daha detaylı bir şekilde 8'inci bölümde bahsedeceğimiz seyyar satıcı problemini (traveling salesman problem) popüler hâle getirmesi, 11'inci bölümde tartışacağımız tutsak ikilemini (prisoner's dilemma) bulması ve hatta muhtemelen "software" (yazılım) terimini literatüre kazandırmasıyla tanınır. 1958 yılında yüzde 37 kuralını ilk defa bulan kişi de Flood'dur ve problemle 1949 senesinden itibaren ilgilenmekte olduğunu iddia etmiştir. Ancak kendisi, başka matematikçilerin de konu üzerinde çalıştıklarına işaret etmiştir.

Problemin kökeni hakkındaki açıklamaların yeterli olduğunu düşünüyor ve ekliyoruz. Sekreter problemi neredeyse kusursuz bir matematik bilmecesi olduğunu kanıtlamıştır. Açıklaması kolay; çözmesi zor; cevabı kısa, öz ve uygulamaları da ilgi çekicidir. Sonuç olarak 1950'lerin matematik çevrelerinde hızla yayıldı ve 1960 yılında Gardner'ın makalesi sayesinde halkın büyük oranda ilgisini çekti. 1980'ler ile birlikte problem ve varyasyonları o kadar fazla analiz üretti ki yazılan makalelerde bir disiplin olduğu hakkında tartışmalar başladı.

Sekreter kavramında olduğu gibi her kültürün kendi antropolojik özelliklerini biçimsel sistemler üzerine inşa etmesini görmek büyüleyicidir. Örneğin satranç, Orta Çağ Avrupası'na ait gibi görünse de kaynağı 8'inci yüzyıl Hindistan'ıdır. 15'inci yüzyılda ağır bir şekilde "Avrupalılaştırılmıştır" ve şahlarına kral, vezirlerine kraliçe ve fillerine piskopos adı verilmiştir. Benzer şekilde optimal duraklama problemlerinin her biri kendi zamanının izlerini taşımıştır. 19'uncu yüzyılda bu tarz problemler barok piyangosu ve kadınların kendilerine uygun erkekleri seçmeleriyle belirtilirdi. 20'nci yüzyılın başlarında otel arayan motosikletliler ve kendilerine uygun kadını arayan erkeklerle simgeleştirdi. Erkeklerin baskın olduğu 20'nci yüzyılın ortalarında ise

erkek patronların bayan asistanlar seçmeleriyle. “Sekreter problemi” ismiyle ilk defa açık şekilde dile getirilmesi 1964 yılındaki bir yazıyla olmuş ve bu problem bu isimle anılmaya başlamıştır.

Yüzde 37 Nereden Geliyor?

Sekreter arayışınızda iki şekilde hata yapabilirsiniz: Araştırmayı erken kesmek ya da geç kesmek. Çok erken kestiğinizde en iyi başvurana henüz görmemiş, çok geç kestiğinizde ise var olmayan daha iyi bir adayı beklemiş olursunuz. Optimal strateji açık bir şekilde bu iki strateji arasındaki dengeyi bulmayı gerektirir. Çok fazla araştırma ile az araştırma seçenekleri arasındaki bir ipin üzerinde yürümek gibi...

Eğer amacınız en iyi adayı bulmak ise görüşmeler süresince en iyi adayı bulmadıkça başka bir kişiyi işe almayacağınız açıktır. Ancak sadece en iyi olmak da işi teklif etmek için yeterli değildir. Örneğin ilk aday daha iyisi gelmedikçe işin doğası gereği daima en iyi olacaktır. Daha da genellemek gerekirse, görüştüğümüz bir adayın “o ana kadarki en iyi” aday olma ihtimali görüşmeler devam ettikçe azalacaktır. Örneğin ikinci adayın o ana kadar gördüğümüz en iyi aday olma ihtimali yüzde 50’dir ama beşinci adayın ihtimali sadece yüzde 20’dir. Sonuç olarak en iyi adaylar görüşmeler ilerledikçe daha etkileyici olacak ama gittikçe daha nadir karşımıza çıkacaklardır.

Tamam, şimdi biliyoruz ki karşılaştığımız *ilk* o ana kadarki en iyi adayı seçmek aceleciliktir. Eğer 100 aday varsa *bir sonraki* o ana kadarki en iyi adayı seçmek de sadece bir öncekinden daha iyi olduğu için aceleciliktir. Peki, nasıl ilerleyeceğiz?

Birkaç potansiyel strateji doğal olarak mevcuttur. Örneğin bir adayın diğerlerine nazaran daha iyi olduğunu anladığınız üçüncü seferde kararınızı vermek gibi, belki dördüncü seferde. Ya da belki uzun bir kuraklık -yani uzun bir ara en iyi adayın ortaya çıkmaması durumu- sonrası gelecek olan en iyi adaya işi vermek

gibi.

Ancak gerçek şudur ki nispeten akla yatkın bu stratejilerin hiçbirisi diğerlerinden daha iyi değildir. Bunun yerine optimal çözüm, bizim **Önce Araştır Sonra Seç Kuralı (Look Then Leap Rule)** olarak adlandırdığımız şekildir. Ne kadar etkileyici olursa olsun bir seçim yapmadığınız “araştırma” dönemi -seçeneklerinizi araştırmak, veri toplamak gibi- için önceden bir zaman periyodu belirlersiniz. Bu noktadan sonra “seçim” evresine geçersiniz. Araştırma döneminde görmüş olduğunuz en iyi adaydan daha iyi olan ilk adaya işi vermeye hazır olursunuz.

Önce Araştır Sonra Seç Kuralının nasıl ortaya çıktığını sekreter probleminin en küçük pozisyonundaki iş başvurusu havuzlarında bile geçerli olduğunu düşününce anlayabilirsiniz. Tek başvuranın olduğu problemi çözmek kolaydır. Onu işe alın! İki aday olduğunda ne yaparsanız yapın yüzde 50 başarı şansınız mevcuttur. İlk başvuran adayı işe alabilirsiniz (her zaman yüzde 50 ihtimalle en iyi aday olacaktır) ya da ilk adayı göz ardı edip doğrudan ikinci adayı seçebilirsiniz (bu kişi de yüzde 50 ihtimalle en iyi olacaktır).

Üçüncü bir aday ekleyin ve işlerin bir anda nasıl ilginç bir hâl aldığını görün. Eğer rastgele seçim yaparsak en iyiyi seçme ihtimalimiz yüzde 33 ya da $1/3$ 'tür. İki adayın başvurusunu değerlendirdiğimiz durumdan daha iyi bir olasılığımız elimizde mevcut değildir. Peki, üç adayla en iyiyi seçme olasılığını artırmayı başarabilir miyiz? Tabi ki yapabiliriz ve her şey görüşme yapacağımız ikinci kişiyle ilgilidir. İlk adayla görüştüğümüzde elimizde hiçbir veri yoktur. Her zaman, o ana kadarki en iyi aday olacaktır. Üçüncü adayla görüştüğümüzde ise başka bir hareket tarzımız kalmamış olacaktır. Son adayı işe almak zorundasınız çünkü diğerlerini daha önce elediniz. Ancak ikinci adayla görüştüğünüzde elinizde veri mevcut olacaktır. İlkinden iyi ya da kötü olduğunu bilirsiniz ve onu işe almak ya da göndermek seçeneği

elinizde mevcuttur. Peki, eğer ilkinden iyi ise işe alırsak ya da değil ve işe almazsak ne olur? Üç adayla görüşülen durumlarda bunun en iyi strateji olduğu ortaya çıkmıştır. Üç kişilik problemde bu yaklaşımı kullanmak, şaşırtıcı bir şekilde tıpkı iki adayın olduğu problemdeki gibi yüzde 50 ihtimalle en iyi adayı seçme şansı verir.*

Bu senaryoları dört aday için çözmek bizim yine ikinci adaydan itibaren seçime gitmemiz gerektiğini, havuzda beş aday olduğunda ise üçüncüden önce seçime geçmememiz gerektiğini söylemektedir.

Aday havuzu büyüdükçe araştırmayla seçme faaliyetini ayıran çizgi, havuzun yüzde 37'si** civarında yer alır ve Yüzde 37 Kuralını doğurur. Hiçbirini seçmeden adayların yüzde 37'sine bakın ve daha sonra o ana kadar görmüş olduklarınızın hepsinden daha iyi olan ilk adayı seçmeye hazır olun.

Bu optimal stratejiyi takip etmek sonunda bize en iyi adayı seçmede yüzde 37'lik bir şans tanımaktadır. Stratejinin ve başarı şansının aynı rakam olması merak uyandırıcı simetrilere biridir. Yukarıdaki tablo farklı aday sayıları ile sekreter problemindeki optimal stratejiyi göstermekte, başarı şansının aday sayısı arttıkça tıpkı aday seçme için harekete geçme noktasında olduğu gibi nasıl yüzde 37'ye doğru yaklaştığını bize sunmaktadır.

* Bu strateji ile en iyi adayı eleme ihtimalimiz yüzde 33, en iyi ihtimalle hiç görüşmeme ihtimali ise yüzde 16'dır. Daha fazlasını söylemek gerekirse; üç aday için muhtemel tam altı adet sıralama mevcuttur: 1-2-3, 1-3-2, 2-1-3, 2-3-1, 3-1-2 ve 3-2-1. İlk adaya bakmak ve daha sonra buna üstün gelen ilk kişiyi seçme stratejisi altı durumun üçünde (2-1-3, 2-3-1, 3-1-2) başarılı sonuç verecek ve diğer üçünde de başarısız olacaktır: İkisinde (1-2-3, 1-3-2) aşırı derecede seçici olduğundan, birinde ise (3-2-1) yeteri kadar seçici olmadığından.

** Gerçekte yüzde 37'nin çok az altında bir değerdir. Tam olarak ifade etmek gerekirse adayların incelenecek olanlarının oranı $1/e$ 'dir ($e = 2,71828....$). e , sürekli bileşik faiz hesaplamalarında da karşımıza çıkmakta olan sabittir. Ancak virgülden sonra 12 basamak gidecek kadar kesinlikle e 'yi bilmenize gerek yoktur; yüzde 35 ile yüzde 40 arasındaki bir oran, en iyiye yakın bir başarı oranı yakalamanızı sağlayacaktır. Daha fazla matematiksel detay için kitabın sonundaki notlar bölümüne bakınız.

Aday sayısı	Kaçıncıdan sonraki en iyi adayı seçeceğiniz	En iyiyi seçme şansınız
3	1 (%33,33)	% 50
4	1 (%25)	% 45,83
5	2 (%40)	% 43,33
6	2 (% 33,33)	% 42,78
7	2 (%28,57)	% 41,43
8	3 (%37,5)	% 40,98
9	3 (%33,33)	% 40,59
10	3 (% 30)	% 39,87
20	7 (% 35)	% 38,42
30	11 (% 36,67)	% 37,86
40	15 (% 37,5)	% 37,57
50	18 (% 36)	% 37,43
100	37 (% 37)	% 37,10
1000	369 (% 36,9)	% 36,81

Bir sekreterin optimal bir şekilde seçilmesi

Mümkün olan en iyi strateji izlendiğinde ortaya çıkan yüzde 63'lük başarısızlık oranı bizi kendimize getiren bir gerçektir. Sekreter probleminde optimal bir şekilde hareket etsek bile çoğu zaman başarısız olacağız ve bu da havuzda yer alan en iyi adayı seçemediğimiz anlamına gelmektedir. Bu, mutlak bir biçimde “o kişiyi” arayan romantikler için kötü haber demektir. Ancak bir umut ışığı mevcuttur.

Aday havuzu büyüdükçe, içgüdüsel olarak biliriz ki en iyi adayı seçme şansımız da sürekli olarak azalacaktır. Örneğin, eğer 100 adaylık bir havuzdan rastgele seçim yaparsak başarı şansımız yüzde bir, eğer bir milyon adayın olduğu bir havuzdan

seçim yaparsak, bu sefer de şansımız yüzde 0,0001 olacaktır. Lakin sekreter problemindeki hesap değişmemektedir. Eğer optimal duraklama stratejisini uyguluyorsanız 100 kişilik bir havuzdan en iyi kişiyi seçme olasılığınız yüzde 37'dir. Ve ister inanın ister inanmayın, bir milyon adaydan oluşan bir havuzda da şansınız hâlen yüzde 37'dir. Bu nedenle aday havuzunuz ne kadar büyük ise optimal algoritmayı bilmenin değeri o kadar fazla olacaktır. Çoğu zaman samanlıktaki iğneyi bulamayacağınız doğrudur fakat optimal duraklama, bu samanlığa karşı elinizdeki en iyi stratejidir; hem de samanlık ne kadar büyük olursa olsun.

Sevgililerin Seçimi

Cinsiyetler arasındaki tutku, her çağda sabit miktarda ve birbirine benzer hâlde gözlenmiştir.

—Thomas MALTHUS

İlk öpüştüğüm adamla evlendim. Bu hikâyeyi çocuklarıma anlattığımda neredeyse kusuyorlardı.

—Barbara BUSH

Michael Trick, Carnegie Mellon'da yöneylem araştırması öğretmeni olmadan önce aşkı arayan bir gençti. "Bu konu üzerinde daha önceden çalıştığımı keşfettim. Bu bir sekreter problemiydi! Aday havuzunu doldurmam gerekiyordu ve amacım en uygun olanını seçmekti." Ve işe koyuldu. Hayatında kaç kadınla tanışacağı konusunda bir fikri yoktu ama Yüzde 37 Kuralında belirli bir esnekliği keşfetmişti. Bu kural, aday sayısına uygulanabildiği gibi araştırma için planlanan *süreye de* uygulanabilmekteydi. Araştırmasının 18 yaşından 40 yaşına kadar süreceğini varsayarsak Yüzde 37 Kuralı, araştırma yapmaktan seçim yapmaya geçeceği zamanın 26,1 yaş olduğunu söylemekteydi. Trick'in o zamanki yaşı da tam buna karşılık gelmekteydi. Bu nedenle o ana

kadar çıkmış olduğu kişilerin hepsinden daha iyi birini bulduğunda tam olarak ne yapması gerektiğini biliyordu: O kişiyi seçecekti. “Onun kusursuz biri (modeldeki varsayımlar bunu belirlememe izin vermiyordu) olup olmadığını bilmiyordum lakin algoritmanın bu adımı için gereksinimleri karşılamaktaydı. Ben de bu nedenle evlenme teklif ettim.”

“Ama beni reddetti.”

Matematikçiler en azından 17’nci yüzyıldan bu yana aşk ile sorun yaşamaktadırlar. Efsanevi astronom Johannes Kepler belki de en çok, gezegenlerin yörüngelerinin eliptik olduğunu keşfetmesi ve Galile ile Newton’un konu hakkındaki tüm görüşlerini değiştiren “Kopernik Devrimi’nin” yaratıcısı olması ile tanınmaktadır. Ancak Kepler’in kişisel kaygıları da vardı. 1611 senesinde ilk eşinin ölümünden sonra yeniden evlenmek için uzun ve zorlu bir yola koyuldu ve toplam 11 kadınla tanıştı. İlk dördü içinde Kepler, en çok dördüncü kadından hoşlanmış (“uzun boyu ve atletik vücudu nedeniyle”) fakat araştırmasını sonlandırmamıştı. “Aşk ve mantık beni beşinci kişiyle görüşmeye zorlamasaydı, dördüncü kadında karar kılabilirdim. Bu kadın beni aşk, mütevazı bir sadakat, ev ekonomisi ve üvey çocuklarına sunduğu sevgiyle kazanmıştı.”

Ancak Kepler anılarına şu satırla devam ediyordu: “Ama arayışı sürdürdüm.”

Kepler’in arkadaşları ve akrabaları onu başkalarıyla tanıştırmaya devam etti ve o da arayışına devam etti. Lakin akıllı beş numaralı kadında kalmıştı. Toplamda 11 kişiyle tanıştıktan sonra daha fazla aramama kararını aldı. “Regensburg’a gitmeye hazırlanırken beşinci kadına gittim, niyetimi belirttim ve o da kabul etti.” Kepler ve Susanna Reuttinger evlendi ve Kepler’in ilk evliliğinden olan çocuklarıyla birlikte toplam altı çocukları oldu. Biyografilerde, Kepler’in ev yaşantısının mutlu ve huzurlu olduğu yazmaktadır.

Kepler ve Trick'in ikisi de -zıt yönlerde- sekreter probleminin aşk arayışını nasıl sadeleştirebildiğine en ön sıradan şahitlik edebilmişlerdir. Klasik bir sekreter probleminde adaylar, Trick'in reddedilmesinin aksine her zaman önerilen işi kabul ederler. Ve Kepler'in yaşadıklarının aksine adaylar, bir kez görüşüldükten sonra yeniden kendilerine dönülebilir durumda değildirler.

Sekreter probleminin ortaya konulmasının üzerinden geçen onlarca yıl içerisinde senaryonun değişik türleri üzerinde, optimal duraklamanın belirli bir grup üzerinde işe yaramasını sağlayan bazı stratejiler üzerinde çalışılmıştır. Örneğin reddedilme olasılığının düz matematiksel bir çözümü bulunmaktadır: Erken ve sık bir şekilde teklifte bulunmak. Diyelim ki yüzde 50 reddedilme ihtimaliniz var. O zaman Yüzde 37 Kuralına çıkan matematiksel analiz bize, araştırmalarımızın *çeyreğini* geçtikten sonra teklif etmeye ve seçim yapmaya başlamamız gerektiğini söylemektedir. Eğer reddedilirsenez, biri kabul edene kadar o ana kadar karşınıza çıkan en iyi adaya teklif etmeye devam edin. Böyle bir strateji kullanarak genel bir başarı yakalama şansınız -ki bu örnekte başarı havuzdaki en iyi adayı seçmek anlamına gelmektedir- yine yüzde 25 olacaktır. Belki de standartları sağlama ile reddedilme olasılıklarını birleştiren bir senaryo için o kadar da kötü bir ihtimal değildir.

Kepler, araştırmaya devam etmesini sağlayan şeyin “şüphecilik ve içinin rahat edememesi” olduğunu söylüyordu. Bir sırdaşına yazdığı mektupta şöyle diyordu: “Bir türlü rahat edemeyen kalbimin kaderine razı gelmesinin nedeni, çok fazla arzusunun tatmin edilmesinin imkânsızlığının farkına varmasıydı. Bunun başka bir yolu var mıydı?” Burada da görüyoruz ki optimal duraklama stratejisi bir teselli ve avuntu sunmaktadır. Şüphecilik ve içinizin rahat edememesi ahlaki ya da psikolojik bozulmanın bir göstergesi olmaktansa ikinci şansların mevcut oldu-

ğu senaryolar için en iyi stratejinin bir parçası olmaktadır. Eğer daha önce değerlendirdiğiniz adaylara geri dönme şansınız olsaydı o zaman optimal duraklama algoritması alışık olduğumuz Önce Araştır Sonra Seç kuralına benzerdi: Seçim yapmadan uzun süre geçirmek.

Örneğin, erkenden yapılan tekliflerin kabul edildiğini ve geciken tekliflerin yarısının reddedildiğini varsayalım. O zaman matematik size, adayların yüzde 61'ini görene kadar bağlayıcı karar almamanızı ve kalan yüzde 39'luk aday havuzunda daha iyisini bulursanız onu seçmenizi söyleyecektir. Eğer tüm adayları değerlendirdikten sonra hâlen Kepler gibi bekârsanız o zaman elinizden kaçırdığınız en iyi adaya geri dönün. Bu senaryoda en iyi adayla eşleşme ihtimaliniz yine yüzde 61 civarındadır ve strateji ile sonuç arasındaki simetri burada da geçerli olacaktır.

Gerçeklik ile sekreter problemi arasındaki fark Kepler'e mutlu bir son getirmişti. Aslında klasik problem üzerindeki değişiklik Trick için de işe yaramıştı. Reddedildikten sonra eğitimini tamamladı ve Almanya'da bir iş buldu. Orada "barda tanıştığı bir kadına âşık oldu, üç hafta sonra onun yanına taşındı ve daha sonra onu 'bir süreliğine' Amerika'da yaşamaya davet etti." Kadın bunu kabul etti ve altı sene sonra evlendiler.

İyi Bir Şey Gördüğünüzde Bunun Farkına Varma:

Tam Bilgi

Ele aldığımız değişik türlerden ilki, klasik sekreter probleminin, zamanında yapılan tekliflerin her zaman kabul edileceği ve geç olanlarında asla kabul edilmeyeceğine dair varsayımlarını -reddedilme ve geri dönme seçeneği olacak şekilde- değiştirmiştir. Bu gibi türler için en iyi yaklaşım ise orijinal yaklaşımla aynıdır: Bağlayıcı karar vermeden bir süre araştırma yapmak ve daha sonra seçim yapmaya hazır olmak.

Ancak sekreter probleminin inceleyebileceğimiz daha temel bir varsayımı bulunmaktadır. Sekreter probleminde adaylar hakkında birbirleriyle kıyaslanmaları dışında *hiçbir şey* bilmemekteyiz. Bir amaç değerimiz ya da bir adayın iyi veya kötü olmasını sağlayan şeyin ne olduğuna dair bir kıstasımız bulunmamaktadır, dahası iki adayı karşılaştırdığımızda ikisinden hangisinin daha iyi olduğunu bilmemize rağmen ne kadar iyi olduğunu bilmeyiz. Beklenti ve standartlarımızı ayarlamaya çalışırken erkenden karışımıza çıkan süper bir adayı es geçmemize neden olan “arama-araştırma” aşamasının sebebi de işte tam budur. Matematikçiler bu tarz optimal duraklama problemlerine “bilginin mevcut olmadığı oyunlar” demektedir.

Bu durum tartışmasız bir şekilde bir ev, eş ya da sekreter için olan arayıştan uzaktır. Bu durum yerine objektif bir kriterimizin olduğunu hayal edin. Örneğin SAT, GRE ya da LSAT gibi sınavlara benzer bir şekilde her sekreterin bir daktilo/klavye sınavına girdiğini düşünün. Bu durumda her adayın notu, adayın teste girenler içindeki yerini söyleyecektir. 100 üzerinden 51 alan bir aday ortalamanın biraz üzerinde yer alacaktır. 75 alan bir aday ise sınava girmiş olan her dört adayın üçünden daha iyi demek olacaktır.

Aday havuzumuzun nüfusun genelini temsil ettiğini ve herhangi bir şekilde aday havuzundan keyfî seçim yapılamayacağını varsayalım. Hatta başvuranları değerlendirmek için daktilo/klavye kullanma hızının önemli olan tek şey olduğunu kabul edelim. Artık elimizdeki probleme matematikçiler “tam bilgi” derler ve bu durumda her şey değişir. Problem üzerine 1966’da yazılmış olan bir makale bu durumu şöyle anlatmaktadır: “Bir standart belirlemek için herhangi bir tecrübe birikimine gerek yoktur ve bazen kârlı bir karar derhâl verilebilir.” Diğer bir deyişle 95 alan bir aday eğer değerlendirdiğimiz ilk aday olursa

bunu anında bilir ve onu işe alabiliriz; elbette ki havuzda 96 alan bir adayın olmadığını düşünüyorsak.

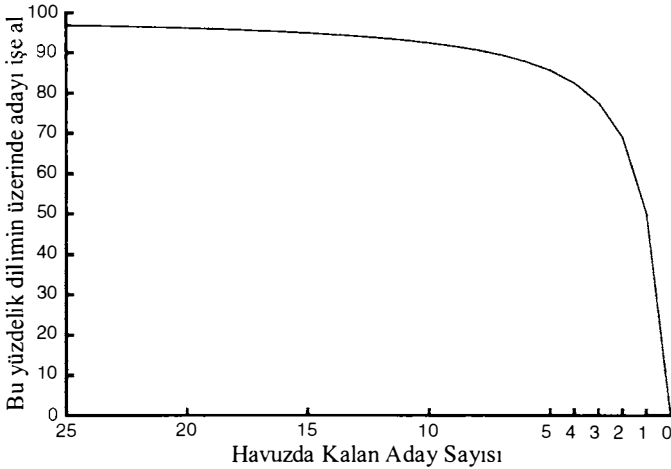
Fakat burada da başka bir sorun vardır. Eğer amacımız yine iş için en iyi adayı bulmak ise elimizdekinden daha iyi bir adayın olma ihtimalini hesaplamamız gerekmektedir. Tam bilgiye sahip olmak, doğrudan hesap yapabilmek için ihtiyacımız olan her şeyi bize sunmaktadır. Diyelim ki bir sonraki adayın 96 ve üzeri bir not almış olma ihtimali her zaman 20’de 1 olacaktır. Bu nedenle durup durmama kararı tamamen göreceğimiz aday sayısına bağlıdır. Tam bilgi, seçim yapmadan önce araştırmaya gerek olmadığı anlamına gelir. Bunun yerine, belirli bir yüzde düzeyinin üzerindeki ilk adayı işe aldığımız **Eşik Değer Kuralını (Threshold Rule)** kullanabiliriz. Eşik değeri belirlemek için birincil aday grubuna bakmamız gerekmez.

Rakamlar bize, aday havuzunda daha bakılabilecek çok fazla aday olduğunda çok iyi bir adayı, daha iyi birini bulma umudu ile es geçmeniz gerektiğini söylemektedir. Lakin elinizdeki seçenekler azaldıkça sadece ortalamanın biraz üzerinde yer alan birini de işe almaya hazır olmalısınız. Çok ilham verici olmasa da bilindik bir söz vardır. Az sayıda kişi içinden seçim yapacaksanız standartlarınızı düşük tutun. Bu düşüncenin tersi de geçerlidir. Eğer denizde çok balık varsa standartlarınızı yükseltin. Her iki durumda da ne kadar yükselteceğinizi size rakamlar söyleyecektir.

Bu senaryoda yer alan rakamları anlamanın en iyi yolu, son- dan başlayarak geriye doğru düşünmektir. Elbette ki eğer son adaya kaldıysanız onu işe almak zorundasınız. Sondan bir önceki adaya baktığınızda soru şu hâli alır: Acaba notu 50’nin üzerinde midir? Cevap eğer evet ise o zaman işe alın, değilse son adayda şansınızı deneyin çünkü yüzde 50 ihtimalle daha iyi olacaktır. Benzer şekilde eğer 69’un üzerinde notu varsa sondan üçüncü, 78’den iyi ise sondan dördüncü ... vb. şekilde seçim yapmak ge-

reker. Ne olursa olsun, seçenekleriniz tamamen tükenmeden ortalamının altındaki birini işe almayın. (Ve ayrıca hâlen aday havuzundaki en iyiyi bulmayla ilgilendiğinizden o ana kadar gördüklerinizin içinde en iyi olmayan birini kesinlikle işe almayın.)

Sekreter probleminin tam bilgiye dayalı şekli en iyi adaya ulaşma ihtimalinizi yüzde 58'e çıkarır ama bu rakamla garanti bir seçenekten yine de uzak olursunuz. En azından bu rakam, hiçbir bilginin olmadığı senaryodaki yüzde 37 olasılığından daha iyidir. Eğer elinizde tüm gerçekler ve bilgiler olursa, aday havuzunuz çok büyük olsa bile başarılı olma ihtimaliniz daha fazladır.



Tam bilgili sekreter probleminde optimal duraklama eşiği

Tam bilgi sahibi olunan senaryo beklenmedik ve biraz garip durumlarda işe yarar. *Define aramak, aşkı aramaktan daha kolaydır.* Eğer eşinizi objektif bir kritere göre değerlendiriyorsanız -diyelim ki gelirine göre- standart belirlemek için hem tecrübe hem de ilişki gerektiren toz pembe dünyaya (aşk) nazaran daha fazla bilgi emrinize amadedir.

Elbette ölçmekte olduğunuz şeyin kesin olmasına -daktilo hızı gibi- gerek yoktur. Bir adayın genele nazaran nerede yer

aldığını gösteren bir ölçüt, çözümü önce araştır sonra seçim yap kuralından eşik kuralına dönüştürecek ve gruptaki en iyi adayı bulma şansınızı önemli miktarda artıracaktır.

Sekreter probleminin başka varsayımlara dayalı pek çok çeşidi mevcuttur ve belki de bunlar, gerçek yaşamda doğru eşi ya da sekreteri bulmaktan daha yakın olayları anlatmaktadır. Optimal duraklama yaklaşımından alınacak dersler, eş bulma ya da personel seçimiyle sınırlı değildir. Aslında seçeneklerin teker teker karşımıza çıktığı durumlarda en iyi seçimi yapmaya çalışmak bir evi satmanın, otomobili park etmenin ve bir şeyi bırakmanın temel yapısını teşkil etmektedir. Ve bunların hepsi bir dereceye kadar çözülmüş sorunlardır.

Bir Şeyi Ne Zaman Satmalı?

Klasik sekreter probleminin iki özelliğini değiştirirsek kendimizi aşk âleminde emlak âlemine gelmiş olarak buluruz. Daha önce daire kiralama sürecinin bir optimal duraklama problemi olduğundan bahsettik. Lakin ev *sahibi* olmanın da optimal duraklama problemlerinden aşağı kalır bir yanı yoktur.

Örneğin, bir evi satmakta olduğunuzu hayal edin. Çeşitli emlakçılara danıştıktan sonra ilanınızı verirsiniz, evinizi elden geçirir ve tekliflerin gelmesini beklersiniz. Bir teklif size ulaştığında bunu kabul ya da reddetmemek zorundasınız. Kabul etmemenin bir maliyeti vardır: Bir sonraki teklif gelene kadar ev kredisini ya da diğer giderleri ödemeye devam etmek zorunda kalırsınız. Bu arada, bir sonraki teklifin daha iyi olacağının da garantisi yoktur.

Bir evi satmak, tam bilgili senaryoya benzemektedir. Tekliflerin para birimi cinsinden gerçek değerini biliriz. Böylece bu bilgi bize sadece diğerlerinden iyi olup olmadığını değil, aynı zamanda diğerlerinden ne kadar iyi ya da kötü olduğunu söyler. Dahası, pazarın büyük kesimi hakkında bilgi sahibi oluruz ve

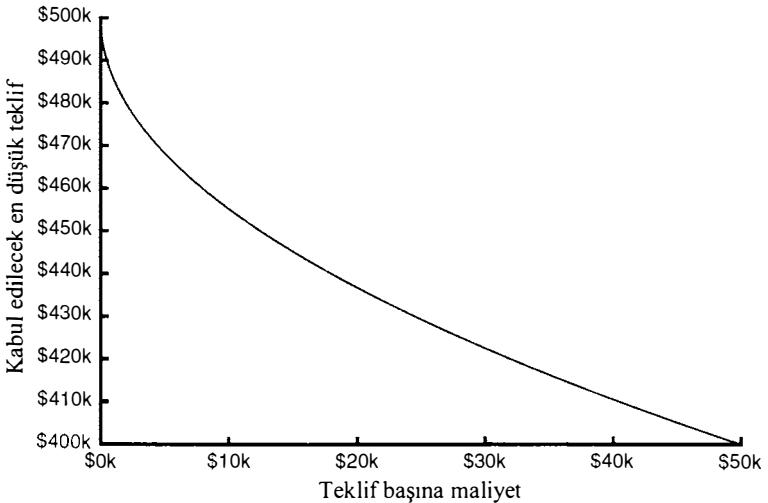
böylece en azından kabaca gelecek olan tekliflerin aralığını bilme olanağımız vardır. (Bu da bizim biraz önceki daktilo/klavve sınavı sonuçlarındaki 100 üzerinden olan değerlendirme puanı gibi bilgi sahibi olmamızı sağlar). Ancak buradaki fark, hedefimizin aslında en iyi teklifi almak olmamasıdır. Burada amacımız, tüm süreç boyunca en kârlı olan seçeneği tercih etmektir. Para birimi cinsinden ölçülen bir maliyet olduğu düşünüldüğünde bugün verilen iyi bir teklif, birkaç ay sonra verilecek olan biraz daha iyi teklife karşı üstün olmaktadır.

Bu bilgiye sahip olarak, bir eşik değer belirlemek için tarafsız bir araştırma yapmamıza gerek yoktur. Hemen bir değer belirleyebilir ve bunun altındaki teklifleri göz ardı ederek bunun üzerindeki ilk teklifi kabul edebiliriz. Eğer belirli bir zaman dilimi içinde evi satmazsak, tükenecek bir birikime sahipsek ya da sadece sınırlı sayıda teklif alma durumumuz varsa ve bundan sonrası önemli değilse, o zaman bu sınırlar yaklaştıkça standardımızı düşürmeliyiz. (Ev satın almaya çalışanların “motive olmuş” satıcılar aramasının bir nedeni vardır). Eğer bu durumların hiçbirini bizi güvende hissettirmeyecekse, sadece bekleme taktiğinin fayda-maliyet analizine odaklanabiliriz.

Burada en basit durumlardan birini analiz edeceğiz. Tekliflerin geleceği fiyat aralığını kesin olarak bilmekteyiz. Eğer tekliflerin (ya da birikimimiz) tükenmesi konusunda endişe etmemize gerek yok ise, daha iyi bir teklif beklemekle kazanacağımız ya da kaybedeceğimiz şeylerin cinsinden olaya bakabiliriz. Eğer mevcut teklifi geri çevirirsek, daha iyi teklif olma ihtimali (ne kadar iyi olmasını beklediğimiz de eklendikten sonra) beklemenin maliyetini karşılayacak mıdır? Burada yapılacak hesap oldukça açıktır. Duraklama fiyatının fonksiyonu bize, bir teklifi beklemenin maliyetini vermektedir.

Bu matematiksel sonuç, milyon dolar değerindeki bir malikâne ya da döküntü bir kulübe satın satmadığınıza bakmaz.

Onun için önemli olan tek şey, alacağınız en düşük ve en yüksek teklif arasındaki farktır. Bazı somut rakamlar girerek bu algoritmanın bize açık bir şekilde nasıl rehberlik edebileceğini görebiliriz. Diyelim ki beklediğimiz teklifler 400.000 ila 500.000 dolar arasında olsun. İlk olarak, eğer bekleme maliyeti önemsizse sınırsız bir şekilde seçim yapabiliriz. Eğer yeni bir teklifi almak için katlanılması gereken maliyet sadece bir dolar ise o zaman evimiz için 499.552,79 dolar ödeyecek birini bekleyebiliriz. Eğer bekleme maliyeti teklif başına 2.000 dolar ise 480.000 dolara kadar bekleyebiliriz. Bekleme maliyetinin teklif başına 10.000 dolar gibi bir rakama karşılık geldiği yavaş bir pazarda ise 455.279 dolar üzerindeki bir teklifi hemen kabul etmeliyiz. Son olarak eğer bekleme maliyeti fiyat aralığının yarısını geçerse (bu örnekte bu rakam 50.000 dolardır) bu durumda beklemenin herhangi bir anlamı bulunmamaktadır. Gelen ilk teklifi kabul ederek en iyi seçimi yapmış oluruz. Dilenciler tercih yapamazlar.



Ev satma probleminde optimal duraklama eşiği

Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta eşik değerimizin *sadece* araştırma maliyetine bağlı olmasıdır. Bir sonraki teklifin daha iyi -ve bunu öğrenme maliyetinin daha yüksek- olma ihtimali değişmediği için bizim duraklama fiyatımızın araştırma sürdükçe düşmesi için bir neden bulunmamaktadır. Bunu daha başlamadan belirleriz ve sonuna kadar sadık kalırız.

Wisconsin-Madison Üniversitesi'nden bir optimizasyon uzmanı olan Laura Albert McLay, optimal duraklama problemleri konusundaki bilgisine kendi evini satmak durumunda kaldığında başvurduğunu hatırlamaktadır. “İlk gelen teklif şahaneydi ama bir ay önceden evi boşaltmamızın getireceği büyük masrafı da yanında taşımaktaydı. Bir başka teklif de vardı...[lakin] doğru teklif gelene kadar bekledik.” Birçok satıcı için iyi bir ya da iki teklifi geri çevirmek sinir bozucu bir durum yaratabilir; özellikle hemen ardından gelen teklifler iyi olmadığında. Ancak McLay sakinliğini korudu ve bekledi. “Eğer rakamların benim tarafımda olduğunu bilmeseydim evi satmam gerçekten zor olurdu.”

Bu prensip ciddi teklifler aldığınız ve bir sonraki teklifi görmek için bir maliyetle karşılaştığınız her durumda geçerlidir. Sonuç olarak bunun bir evi satmanın ötesinde de uygulama alanları vardır. Örneğin ekonomistler, bu algoritmayı insanların nasıl iş aramaları gerektiğini modellemek için ve aynı anda mevcut iş arayanlarla boş kalan işler arasındaki paradoksu çözmek için kullanmışlardır.

Aslında optimal duraklama probleminin bu çeşidinin bir başka şaşırtıcı özelliği daha vardır. Daha önce de gördüğümüz gibi geçmiş bir fırsata geri dönebilmek Kepler'in gönül işleri macerasında oldukça önemliydi. Ancak iş peşinde koşarken ya da ev satarken eski bir teklifi değerlendirmek mümkün olsa ve hatta bu teklif hâlen geçerli olsa bile bunu *asla* yapmamalısınız. Eğer daha önce eşik değerinizin üzerinde değilse, şimdi de olmayacaktır. Araştırma için katlandığınız masraf boşa gitmiş olur. Uz-

laşmayın ve ikinci kez değerlendirmeyin. Geriye dönüp de bakmayın.

Arabayı Ne Zaman Park Etmeli?

Bir yerleşkedeki idari üç sorunun öğrenciler için cinsellik, mezunlar için spor ve akademisyen personel için de otomobil park yeri olduğunu düşünürüm.

—Clark KERR, Berkeley Üniversitesi Rektörü,
1958-1967

Optimal duraklama problemlerinin yoğun olduğu -ve geriye dönüş bakmanın genellikle kötü bir tavsiye olduğu- bir diğer alan otomobillerdir. Bu alanla ilgili özellikler sekreter probleminin literatürdeki ilk versiyonlarında görülmektedir ve araçların ileri doğru hareket etmelerinden kaynaklanan problem yapısı otomobillerle seyahatlerin neredeyse tümünü bir duraklama problemine dönüştürmektedir: Bir restoran arama, bir hamam arama ve şehirde yaşayan sürücüler için en yaygın olanı bir park yeri arama. Bu konu hakkında konuşmak için *Los Angeles Times* tarafından “park etme yıldızı” olarak ilan edilmiş olan UCLA’dan şehir planlaması alanında uzman Profesör Donald Shoup’tan daha iyi kimi bulabiliriz ki? Kendisini görmek için Kuzey California’dan araçla yanına gittik. Onu beklenmeyen trafikten dolayı aşırı zaman harcamamız üzerine konuşmaya ikna ettik. Bize şöyle karşılık verdi: “Beklenmedik trafikte nasıl planlama yapıyorsanız, sanırım beklenen trafiğe göre de planlama yapmalısınız.” Shoup muhtemelen en çok *The High Cost of Free Parking* (Bedava Park Etmenin Yüksek Maliyeti) isimli kitabı ile tanınmaktadır ve bir kişinin varış noktasına doğru otomobiliyle gittiğinde gerçekte nelerin olduğunu anlama ve tartışma konularında ilerleme kaydedilmesini sağlamıştır.

O zavallı sürücüye acımamız gerekir. Shoup'un modellediği ideal park yeri, park yerinin bulunduğu konum için arabanıza yapıştırılmak üzere verilen “etiketin fiyatı” ile yürümenin aldığı zaman ve zahmet, yer ararken harcanan zaman (varış noktası, buraya gelinen zaman vb. nedenlerle çok çeşitli değerler alabilmektedir) ve bunları yaparken harcanan yakıt arasındaki hassas dengeyi optimize etmelidir. Denklem, park yerinin fiyatını aralarında bölüşebilecek araçtaki yolcu sayısına göre değişmektedir. Lakin harcanan zaman ya da yürüme konusunda aynı şey söz konusu değildir. Aynı zamanda sürücünün, en fazla müsait park yeri bulunan alanın en fazla talep gören yer olabileceğini göz önüne alması gerekir. Park yeri bulmanın oyun teorisini çağıştıran bir yanı vardır. Siz diğer sürücüleri geride bırakmaya çalışırken onlar da aynı şeyi size karşı yapmaya çalışmaktadırlar.* Bununla birlikte park etmeyle ilgili birçok sorun tek bir rakamda birleşmektedir: Doluluk oranı. Bu rakam, herhangi bir zamandaki dolu olan park yeri sayısının mevcut bütün park yeri sayısına oranıdır. Eğer doluluk oranı düşükse iyi park yeri bulmak kolaydır. Eğer yüksek ise sadece aracınızı park edecek yer bulmak bile bir sorun olmaktadır.

Shoup park etmeyle ilgili baş ağrısına neden olan sebeplerin çoğunun, oldukça yüksek doluluk oranlarına neden olan şehircilik politikalarının sonuçları olduğunu ileri sürmektedir. Eğer bir yerde park etmenin maliyeti çok düşük ise (ya da daha korkuncu, bedava ise!) o bölgeye park etmek için büyük bir talep olur. İnsanlar yakın bir yere park edip kısa bir mesafe yürümektense bedava park etmeye çalışır ama park alanının yüksek doluluk oranına ulaşması neticesinde, park yeri bulmak için daha fazla zaman ve yakıt harcarlar.

* Oyun teorisi hesaplamalarına yönelik daha fazla bilgi için 11'nci bölüme bakınız.

Shoup'un çözümü talep artıkça yükselen, değişken fiyat yeteneğine sahip dijital parkmetreler kullanmayı içermektedir. (Bu uygulama şu anda San Francisco şehir merkezinde yürürlüktedir). Fiyatlar doluluk oranına göre önceden belirlenir ve Shoup, fiyat belirleme doluluk oranının yüzde 85 civarında olması gerektiğini savunmaktadır. Bu oran, kaldırımları yüzde 100 doluluğa sahip birçok büyük şehirden oldukça farklı bir rakamdır. Onun da belirttiği gibi doluluk oranı yüzde 90'dan yüzde 95'e yükseldiğinde sadece yüzde beşlik araç artmasına karşılık insanların park yeri arama zamanı iki katına çıkmaktadır.

Doluluk oranının park etme stratejisi üzerindeki ana etkisi, park etme probleminin bir optimal duraklama problemi olduğunu anladığımızda açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bir sokakta aracınızla ilerlerken ne zaman bir park yeri görseniz karar vermek zorunda kalırsınız: Buraya aracınızı park etmeli misiniz, yoksa varış noktanıza biraz daha yaklaşıp şansınızı mı denemelisiniz?

Park yerlerinin düzgün bir şekilde dağılmış olduğu sonsuz uzunlukta bir yolda olduğunuzu ve amacınızın varış noktasına kadar yürüyeceğiniz mesafeyi minimize etmek olduğunu düşünün. O zaman çözümünüz Önce Ara Sonra Seçim Yap kuralıdır. Optimal duraklama stratejisini uygulayan sürücü belirli bir mesafeye kadar olan tüm boş yerleri geçecek ve ondan sonraki ilk yere aracını park edecektir. Ve arada oluşacak mesafe farkı doluluk oranına bağlı olarak değişecektir. Bir sonraki sayfada yer alan çizelge bazı temsili oranlar için mesafeleri göstermektedir.

Eğer bu sonsuz sokağın yüzde 99 gibi büyük bir doluluk oranı ve sadece yüzde bir boş yeri olursa o zaman 70'nci park yerinden sonra göreceğiniz ilk boş yere park etmeniz gerekir ve bu da varış noktanıza 400 metreden daha uzun bir mesafe kaldığı anlamına gelir. Ancak eğer Shoup'un yolunu denerseniz ve doluluk oranı sadece yüzde 85'e kadar düşerse o zaman yarım blok

Şu doluluk oranı ile...(%)	Bu kadar yer geçin ve sonra ilk boş park yerini alın
0	0
50	1
75	3
80	4
85	5
90	7
95	14
96	17
97	23
98	35
99	69
99,9	693

Optimal olarak park yeri bulma

mesafe kalana kadar ciddi bir şekilde yer aramak zorunda kalmazsınız.

Birçoğumuz kusursuz bir şekilde düz ve sonsuz yollar üzerinde araç kullanmayız. Bu nedenle diğer optimal duraklama problemlerinde olduğu gibi burada da araştırmacılar bu temel senaryo üzerinde çeşitli değişiklikler düşünmüşlerdir. Örneğin sürücünün U dönüşü yapabileceği, varış noktasına yaklaşıldıkça daha az park yeri olan ve sürücünün aynı istikamette ilerleyen diğer sürücülerle rekabet hâlinde olduğu optimal park etme stratejisi üzerine çalışmışlardır. Ancak problemin parametreleri ne olursa olsun, daha fazla boş park yeri her zaman hayatı daha kolaylaştıracaktır. Bu durum belediyelere bir gerçeği hatırlatmaktadır. Park yeri sorunu sadece kaynağa (park yerlerine) sahip olup bunun

kullanımını maksimize etme (doluluk) kadar basit değildir. Ayrıca park yeri sorunu bir *süreç* tir. Bir optimal duraklama problemidir ve ilgi, zaman, yakıt tüketen ve hem sıkışıklık hem de çevre kirliliği yaratan bir problemdir. Doğru bir politika tüm probleme değinir. Ve bunun karşılığında oldukça talep edilen bloklar-daki boş park yerleri de işlerin yolunda gittiğine dair bir işaret olarak algılanabilir.

Shoup’a, araştırmasının UCLA’ya doğru Los Angeles trafiğinde işe gidişinde optimal olarak işe yarayıp yaramadığını sorduk. Park yeri konusunda tartışmasız dünyanın en önde gelen uzmanının gizli bir silahı vardı.

Cevabı şöyle oldu: “Bisiklet kullanıyorum.”

Ne Zaman Bırakmalı?

1997 senesinde *Forbes* dergisi Boris Berezovsky’yi üç milyar dolar civarı varlığıyla Rusya’daki en zengin kişi olarak gösterdi. Sadece on sene önce, SSCB Bilim Akademisi’nden almakta olduğu bir matematikçi maaşıyla yaşamını sürdürmekteydi. Yabancı otomobil üreticileriyle Sovyet otomobil üreticisi AvtoVAZ şirketi arasında ilişkiler geliştiren bir şirket kurarak yaptığı endüstriyel araştırmalar sayesinde milyar dolarlar kazandı. Berezovsky’nin şirketi daha sonra Rus rublesindeki hiper enflasyondan faydalanmayı amaçlayan bir ödeme planı kullanarak AvtoVAZ’ın ürettiği otomobillerin büyük ölçekli bir satıcısı konumuna geldi. Bu ortaklıktan gelen fonları kullanarak AvtoVAZ şirketinin bir kısmını satın aldı ve daha sonra ORT televizyon kanalı ile Sibneft petrol şirketini satın aldı. Yeni bir oligarşi sınıfının üyesi olarak 1996’da Boris Yeltsin’in yeniden seçilmesini ve 1999’da kendisinden sonra gelmek üzere Vladimir Putin’i seçmesini destekleyerek siyasette yer aldı.

Ancak Berezovsky’nin yükselişi bu noktadan sonra tersine döndü. Putin’in seçilmesinden kısa süre sonra Berezovsky, baş-

kanın yetkilerini genişletecek anayasal düzenlemelere karşı çıktı. Putin'i açıkça eleştirmeye devam etmesi ilişkilerinin kötüleşmesine neden oldu. 2000 senesinde Putin'e Berezovsky'nin kendisi hakkındaki eleştirileri sorulduğunda cevabı şu olmuştu: "Devletin bir sopası vardır; sadece bir kez kullanır ve tam kafaya vurur. Bunu henüz kullanmadık... Gerçekten kızdığımız bir gün, bunu kullanmak için tereddüt etmeyeceğiz." Bir ay sonra Berezovsky, Rusya'yı kalıcı olarak terk etti ve Putin rejimini eleştirmeye devam ettiği İngiltere'ye gitti.

Berezovsky Rusya'yı terk etme zamanının geldiğine nasıl karar vermişti? "Önde giderken bırakmaya" matematiksel olarak karar vermenin bir yolu olabilir mi? Berezovsky bu soruyu kendisine sormuş olabilir çünkü yıllarca bir matematikçi olarak üzerinde çalıştığı konu optimal duraklamadan başka bir şey değildi. Yazdığı ilk (ve tek) kitabı tamamen sekreter problemi üzerineydi.

Öndeyken bir şeyi bırakma problemi üzerine çeşitli isim ve şekiller altında çalışmalar yapılmıştır ve Berezovsky'nin durumuna en uygun olanı -Rus oligarkların affına sığınarak söylüyorum ki- "hırsız problemi (burglar problem)" olarak bilinmektedir. Bu problemde hırsız bir dizi hırsızlık yapma fırsatına sahiptir. Her soygunun bir getirisi ve bununla kaçabilme ihtimali vardır. Ancak eğer hırsız yakalanırsa tutuklanır ve topladığı tüm ganimetleri kaybeder. Beklediği kârını maksimize etmek için hangi algoritmayı kullanmalıdır?

Bu problemin bir çözümünün olduğu gerçeği, çekilecek olan soygun filmleri için kötü haber demektir. Senaristler emekli olmuş yaşlı bir hırsız son bir iş için ikna etmeye çalışadursun bu eski hırsızın yapması gereken tek şey sayılarla ilgilenmektir. Dahası bu çözümle elde edilen sonuçlar oldukça basit ve akla yatkındır. Yapmanız gereken maksimum soygun sayısı kabaca, başarılı olma şansınızın yakalanma ihtimalinize oranı kadardır.

Eğer yetenekli bir hırsızsanız ve her soygunda başarı şansınız yüzde 90 ise (böylece her şeyi kaybetme şansınız da doğal olarak yüzde 10 olur) o zaman $90/10=9$ soygundan sonra emekli olmalısınız. Peki ya yarı yarıya (yüzde 50'ye 50) şansı olan ace-mi bir hırsız için bu sayı kaçtır? İlkinde kaybedecek hiçbir şeyi yoktur ama şansını birden fazla zorlamamalıdır.

Berezovsky'nin optimal duraklama konusundaki tecrübesine rağmen hikâyesi üzücü bir sonla bitmiştir. 2013 senesinin Mart ayında Berkshire'daki evinin banyosunda bir iple asılmış olarak koruması tarafından bulundu. Ölümü sonrasında yapılan incele-menin resmi sonuçlarına göre aralarında Rusya'daki düşmanları-nın da bulunduğu bir dizi dava sonrasında servetinin büyük kıs-mını kaybetmesinin ardından intihar etmişti. Belki de daha erken durmalıydı. Örneğin, birkaç milyon dolar kazandıktan sonra po-litikaya girmeyerek bunu yapabilirdi. Ne yazık ki bu onun tarzı değildi. Matematikçi arkadaşlarından biri olan Leonid Bogu-lavsky, gençlik dönemlerine ait bir hikâye anlattı. Moskova ya-kınlarındaki bir gölde su kayağı için gittikleri bir gezide kullan-mayı planladıkları bot bozulmuştu. David Hoffman, *The Oli-garchs* (Oligarklar) isimli kitabında bu olayın devamını şu şekil-de anlatmaktadır:

Arkadaşları sahile gidip bir ateş yakmalarına rağmen Bo-gulavsky ve Berezovsky motoru tamir etmek için iskeleye gittiler... Üç saat sonra motoru dağıtmışlar ve yeniden toplamışlardı. Hâlen çalışmıyordu. Partinin büyük kısmını kaçırmışlardı ama Berezovsky denemeye devam etmeleri konusunda ısrar etmekteydi. Bogulavsky “Elimizden ge-len her şeyi denemiştik” demişti. Berezovsky vazgeçme-yecekti.

Hiçbir zaman vazgeçmeme stratejisi, optimal duraklama literatüründe şaşırtıcı bir şekilde fazlaca görülmektedir. Daha önce bahsettiğimiz türden problemlere benzer olanlarda değil de optimal duraklama kuralının olmadığı bazı karar verme problemleri vardır. Bunun tipik bir örneği “üç katı ya da hiç” oyunudur. Bir dolarınız olduğunu ve şimdi anlatacağımız oyunu istediğiniz kadar oynayabileceğinizi varsayın. Tüm paranızı yatırdığınızda yüzde 50 ihtimalle paranızı üçe katlayacak, yüzde 50 ihtimalle ise tamamını kaybedeceksiniz. Bu oyunu kaç kere oynamalısınız? Bu problem, basit bir yapıda olmasına karşın herhangi bir optimal duraklama çözümüne sahip değildir. Bir dolarla başladığınızda yüzde 50 ihtimalle üç dolarınız olacak, yüzde 50 ihtimalle ise sıfır dolarınız kalacaktır. Yani ilk turun sonunda elinizde olması beklenen değer 1,5 dolardır. Eğer ilk turda şanslı olmuşsanız, kazanmış olduğunuz üç dolarla önünüzdeki ihtimaller dokuz dolar ve sıfır dolardır. Beklenen değeriniz ise 4,5 dolar olur. Bu sonuçları elde ettiğiniz matematik kuralları sizin *sürekli* oynamaya devam etmenizi söylemektedir. Ancak eğer bu stratejiyi izlerseniz en sonunda elinizdeki her şeyi kaybedeceksiniz. Bazı problemleri çözmeden bırakmak, çözmekten daha iyidir.

Her Zaman Durun

Bu dünyadan sadece bir kere geçmeyi bekliyorum. Bu nedenle yapabileceğim bir iyiliği ya da bir yaratılana gösterebileceğim şefkati bırakın şimdi göstereyim. Bunu atlamama izin verme, buradan bir kez daha geçmeyebilirim.

—Stephen GRELLET

Öğleden sonralarınızı harcayın gitsin. Onları yanınızda götüremezsiniz.

—Annie DILLARD

Yaşamlarında duraklama problemleriyle karşılaşan kişilerin belirli durumlarına göz attık ve günlük olarak her birimizin o ya da bu şekilde bunlarla karşılaşmakta olduğumuzu açık bir şekilde ortaya koyduk. İster sekreterleri içersin, isterse finans konularını ya da kiralık evleri, yaşam optimal duraklama sorunlarıyla doludur. Bu nedenle karşımıza çıkan kaçınılmaz soru ister eğitimsel, ister evrimsel isterse de içgüdüsel olsun, gerçekten en iyi stratejileri seçip seçmediğimizdir.

Cevap ilk bakışta hayırdır. Bir düzine kadar çalışma hep aynı sonucu vermiştir. İnsanlar erkenden bırakma ve en iyi alternatifleri görmeden vazgeçme eğilimindedir. Bu konu hakkında daha iyi fikir sahibi olmak için 40 yılı aşkın bir süredir laboratuvarında optimal duraklama deneyleri icra etmekte olan UC Riversi-de'dan Amnon Rapoport'la görüştük.

Klasik sekreter problemine en yakın çalışmalar 1990'larda Rapoport ve iş ortağı Darryl Seale tarafından yürütülmüştür. İnsanlar bu çalışmada, her birinde 40 ya da 80 adayın yer aldığı sekreter probleminin çeşitli tekrarlarını uygulamışlardır. İnsanların en iyi adayı bulduğu oran oldukça iyiydi: Yüzde 31. Bu rakam, optimal değer olan yüzde 37'den çok uzak değildi. Birçok kişi Önce Araştır Sonra Seç kuralına uygun bir şekilde hareket etmiş ancak yüzde 80 oranında bu kuraldan daha önce seçim yapmışlardı.

Rapoport bize kendi yaşamında optimal durma problemlerini çözerken bu hususu aklında tuttuğunu söylemişti. Örneğin bir apartman dairesi ararken kendi içinden gelen erkenden dairelerden birini tutma arzusuyla mücadele etmektedir. "Yapım gereği çok sabırsız olmama ve ilk gördüğüm apartman dairesini tutmak istememe rağmen kendime hâkim olmaya çalışıyorum!"

Ancak bu sabırsızlık, klasik sekreter probleminde göz önüne alınmamış olan bir başka durumu gözler önüne sermektedir: Zamanın problemdeki rolü. Sonuçta sekreter arayışında olduğunuz

tüm o süre zarfında bir sekreteriniz bulunmamaktadır. Dahası, gününüzü kendi işlerinizi yapmak yerine sekreter adaylarıyla görüşmeler yaparak geçirmektesiniz.

Bu tür bir maliyet, insanların laboratuvar ortamında bir sekreter problemini çözerken neden erkenden durma eylemi sergilediklerine muhtemel bir açıklama sağlamaktadır. Seale ve Rapoport, optimal strateji deneylerinde her bir sekreter adayıyla görüşmenin maliyetinin, en iyi sekreter adayını bulmanın maliyetinin yüzde biri kadar bir maliyete sahip olduğu durumda aramayı sonlandırıp seçime giden kişilerin stratejilerinin optimal olduğunu göstermişlerdir.

Buradaki gizem, Seale ve Rapoport'un çalışmalarında araştırma maliyetinin mevcut olmamasıdır. Peki o zaman, laboratuvar deneyinde yer alan kişiler neden böyle bir maliyet varmış gibi hareket etmektedir?

Çünkü insanlar açısından, *daima* bir zaman maliyeti vardır. Bu maliyet, deneyin kendi tasarımıyla kaynaklanmamaktadır. İnsanların yaşamlarından kaynaklanmaktadır.

Araştırmanın “içinde” yer alan ve genellikle optimal duraklama problemleri içinde ele alınmayan zaman maliyetleri insanların karar verme modellerinde düzenli olarak neden sapmalar sergilediğini açıklamaktadır. Optimal duraklama konusunda bir araştırmacı olan Neil Bearden bu konuyu şu şekilde belirtmektedir: “Bir süre araştırdıktan sonra biz insanlar sıkılma eğilimindeyiz. Canımızın sıkılması mantıksız değildir ama bunu düzgün bir şekilde modellemek çok zordur.”

Ancak bu husus, optimal durma problemlerinin önemini azaltmamaktadır, hatta aslında onları daha da önemli kılmaktadır. Çünkü zamanın akışı *tüm* karar verme eylemlerini bir optimal duraklama problemine dönüştürür.

Optimal duraklama üzerine olan bir ders kitabı giriş bölümünde “Optimal duraklama teorisi belirli bir hareket tarzını uy-

gulamak için zamanı ayarlamaktır” ifadesine yer verir ve insanların durumuna daha uygun bir ifade bulmak zordur. Hisse senedi almak ve aldıklarımızı satmak için doğru zamana karar verilir. Aynı zamanda özel bir gün için saklamakta olduğumuz şarabı açmak, bir kişinin sözünü doğru anda kesmek ya da bir kişiyi doğru zamanda öpmek için de doğru zamanı kollarız.

Bu açıdan bakıldığında sekreter probleminin en temel ve en inanılmaz varsayımı -katı şekilde bir sırayı izlemesi ve istisnası olmayan tek yönlü ilerlemesi- zamanın ta kendisi olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun gibi, optimal duraklama probleminin de açık bir şekilde ortada olan temel varsayımı canlı olmanın temel varsayımı olmaktadır. Bizi henüz görmediğimiz olasılıklara dayalı olarak karar vermeye zorlayan, optimal şekilde hareket etmemize rağmen büyük riskleri taşımamıza neden olan şey budur. Hiçbir seçenek yeniden karşımıza çıkmaz. Karşımıza *benzer* seçenekler çıkabilir ama bunlar hiçbir zaman öncekinin aynısı olmaz. Tereddüt etme -eylemde bulunmama- de tıpkı eylem gibi geri alınamaz bir şeydir. Tek yönlü bir istikamette ilerleyen bir kişi için uzay ne ise, bizim için de dördüncü boyut budur. Bu yoldan gerçekte sadece bir kez geçmekteyiz.

Akılcı karar vermenin, içgüdüsel olarak seçeneklerimizi yorgunluktan bitene kadar denemek, her birini dikkatlice değerlendirmek ve daha sonra en iyisini seçmek anlamına geldiğini düşünüyoruz. Ancak uygulamada zaman akmaktadır ve karar verme sürecinde *ne zaman durulacağı* kadar önemli olan çok az şey bulunmaktadır.

Araştır/Kullan (Explore/Exploit)

En yeni mi, En iyi mi?

Karnınız gurulduyor. Bildiğiniz ve sevdiğiniz İtalyan restoranına mı, yoksa yeni açılmış olan Tayland restoranına mı gidersiniz? Yanınızda en iyi arkadaşınızı mı götürürsünüz yoksa daha iyi tanımak istediğiniz yeni bir arkadaşınızı mı? Tüm bunlar çok zor mu geldi, belki de evde kalmalısınız. Bildiğiniz tarife göre bir şey mi pişirirsiniz yoksa ilham verici yeni bir tarif için internette mi gezinirsiniz? Boş verin, bir pizza söylemeye ne dersiniz? “Her zaman” aldığınız türden bir pizza mı alırsınız, yoksa özel tatlar bölümünden mi sipariş verirsiniz? Daha ilk ısırığı bile almadan yorgunluktan bittiniz. Müziği açmak, bir film izlemek ya da kitap okumak; hangisi? Bunların hiçbirisi artık kulağa çok da dinlendirici gelmemektedir.

Her gün sürekli olarak, belirli bir özellik açısından birbirinden ayrılan seçenekler arasında karar vermeye zorlanırsınız. Yeni bir şeyler mi denemeliyiz yoksa favorilerimizle devam mı etmeliyiz? Hayatın yenilik ve gelenek, en son çıkanla en iyi olan, risk almakla bildiğimiz ve sevdiğimiz şeyleri sürdürmek arasındaki bir dengeden ibaret olduğunu hepimiz içgüdüsel olarak biliriz. Fakat tıpkı kiralık ev arayışındaki Önce Araştır Sonra

Seç ikileminde olduğu gibi cevaplanmamış olan soru şudur: Dengeyi nasıl sağlayacağız?

Robert Pirsig, 1974'teki klasik *Zen and the Art of Motorcycle Maintenance* dergisindeki yazısında “Yeni nedir?” başlığı altında şunları söylemiştir: “Yeni nedir? Eğer daha derin düşünülürse, sadece önemsiz şeylerin ve modanın geçit törenidir.” Bununla beraber bundan daha üstün ve geniş bir konuyu gündeme getirmektedir: “En iyi nedir?”

Gerçek bu kadar basit değildir. Favori şarkı ya da restoranlarınız arasında “en iyileri” size sadece “yeni” olarak görünüyorsa aslında keşfedilmek üzere bekleyen daha iyilerinin de olabileceğini size işaret eder. Bu nedenle yeni olan şeyler az da olsa ilginizin bir kısmını hak etmektedir.

Atasözleri bu gerilimi kabul etmekte ancak buna bir çözüm de bulamamaktadırlar. “Yeni arkadaşlar edinin ama eskilerini de koruyun / Yeniler gümüş gibidir ancak eskiler altın / Hiçbir yaşam o kadar zengin ya da eşsiz değildir / Ancak hayatına bir dost daha ilave edebilirsin” mısraları yeteri kadar doğrudur. [İngilizce metindeki] kafiyeleri eşsizdir ama iyi bir hayatı oluşturacak “altın” ve “gümüş” karışımının oranını bize söyleme konusunda yetersiz kalmaktadır.

Bilgisayar mühendisleri 50 yıldan uzun bir süredir bu dengeyi bulmak üzerine çalışmaktadırlar. Hatta bunun için kullandıkları bir isim bile vardır: Araştır/Kullan Ödünleşimi.

Araştır/Kullan

Bu iki kelime kulağa zıdda yakın anlamlar çağrışırsa da bir bilgisayar mühendisi için bu kelimelerin daha belirli ve nötr bir anlamı vardır. Basitçe ifade etmek gerekirse araştırmak bilgiyi *toplamak*, kullanmak ise bilinen iyi bir sonuca ulaşmak için elinizdeki bilgiyi *kullanmaktır*.

Hiçbir zaman araştırma yapmadan yaşamının bir yolu olmadığı açıkça ortadadır. Ve elimizdekileri hiçbir zaman kullanmak da oldukça kötü olabilir. Bilgisayar bilimindeki tanımıyla kullanmak, aslında hayatın en iyi anlarını karakterize etmeye karşılık gelir. Tatilde bir araya gelen bir aile aslında kullanmadır. Kitaplara âşık olan birinin elinde bir fincan kahvesi ve sevdiği bir kitapla okuma koltuğuna kurulması ya da bir müzik grubunun en sevilen şarkılarını seyircileri karşısında çalması veya “kendi şarkıları” eşliğinde dans eden bir çiftin anın tadını çıkarması da bu anlardan bazılarıdır.

Lakin araştırmak bazen bir lanete dönüşebilir.

Örneğin müzik hakkında güzel olan şeylerden biri her zaman dinlenecek yeni şeylerin olmasıdır. Eğer bir müzik eleştirmeniy-seniz korkunç olan şey, sürekli olarak dinlenecek yeni şeylerin olmasıdır. Bir müzik eleştirmeni olmak, başka hiçbir şeyin olmadığı bir yerde sürekli olarak araştırma yapmak anlamına gelmektedir. Müzikseverler bu alanda eleştirmenlik yapmanın cennette olmak gibi bir şey olduğunu hayal edebilirler ama her zaman yeni şeyleri keşfetmek zorunda olduğunuzda asla araştırmaların meyvelerinin tadını çıkaramazsınız. Yani, bir nevi cehennemdir. Bu tecrübeyi *Pitchfork*’un eski editörü Scott Plagenhoef kadar iyi bilen çok az kişi vardır. “Sadece dinlemek istediğiniz şeyleri dinlemeye çalışırken kendinize bir yer bulmaya çalışırsınız.” Henüz bilinmeyen müzik eserlerini dinlemeye bir son vermek ve sadece sevdiği şarkıları dinleme konusundaki dinmeyen arzusu o kadar kuvvetliydi ki iPod’una sadece yeni şarkıları koymakta ve kendisi gerçekten, ama gerçekten Smiths dinlemek istediğinde durdurarak vazifesini aksatmadığından emin olmaktaydı. Eleştirmenler diğer kişilerin faydalanabileceği şeyleri araştıran ve keş-feden fedakâr kahramanlardır.

Bilgisayar biliminde araştırma ve kullanma arasındaki gerilim, “çok kollu canavar problemi (multi armed bandit problem)” isimli bir senaryoda en somut hâlini almaktadır. Bu garip isim, “tek kollu canavar” denilen bir kumarhane makinesinden gelmektedir. Her birinin kendine ait ayrı kazandırma oranı olan birbirinden farklı oyun makineleri olan bir kumarhaneye gittiğinizi düşünün. Buradaki sorun elbette ki size bu oranların önceden söylenmiyor olmasıdır. Oynamaya başlayana kadar en kârlı makinelerin (çok kollu canavar tutkunlarının deyimiyle “gevşek”) hangileri olduğuna ve hangilerinin sadece paranızı yuttuğuna ve bir şey kazandırmadığına dair bir fikriniz olmaz.

Doğal olarak kazancınızı maksimize etmek istersiniz. Ve bunun da farklı makinelerde oyun oynamanın (onları test etme; araştırmadır ve en umut vadedenlerde oynama; kullanmadır) bir çeşit kombinasyonunu içerdiği açıktır.

Bu konunun inceliklerini biraz daha iyi anlamak adına karşınızda sadece iki makine olduğunu hayal edin. Toplamda 15 kez oynadığınız makine size dokuz kez kazandırmış ve altı kez kaybettirmiştir. Diğerini ise iki kez oynamışsınız ve bir kez kazandırmış, bir kez de kaybettirmiştir. O zaman bu makinelerden hangisiyle oynamak istersiniz?

Sadece kazandığınız sayıyı toplam oyun sayınıza bölerek makinenin “beklenen değerini” elde edebilirsiniz ve bu metotla birinci makine açık bir şekilde öndedir. Dokuza altılık oyun sonucu yüzde 60 beklenen değer ortaya çıkar. İkinci makinenin değeri ise 1-1’lik sonuçtan dolayı sadece yüzde 50’dir. Ancak konu sadece bunlarla sınırlı olacak kadar basit değildir. Sonuç olarak, sadece iki kez oynamak aslında o kadar da fazla değildir. Yani, ikinci makinenin gerçekte ne kadar iyi olabileceği konusunda henüz bilmediğimiz şeyler vardır.

Bir restoran ya da albüm seçmek aslında bir yaşam kumarhanesinde hangi makinenin kolunu çekeceğinize karar verme sorudur. Ancak araştır/kullan dengesini sağlayan durumu anlamak sadece nerede yemek yenileceği ya da ne dinleneceği konusundaki kararları iyileştirmekle ilgili değildir. Aynı zamanda yaşadıkça hedeflerimizin de değişmesi gerektiğini ve bazen mantıklı hareket tarzının her zaman en iyi görünen yolu seçmek olmadığını anlamamızı sağlar. Ve diğer birçok şeyle birlikte web tasarımı ve ilaç denemelerinin (aynı cümle içinde yan yana gelmeyen bu iki başlığın) de kalbinde bu yatmaktadır.

İnsanlar kararları ortamdan bağımsız, sadece en büyük beklenen çıktıyı sağlaması açısından değerlendirme eğilimindedir. Ancak kararlar neredeyse hiçbir zaman izole değildir ve beklenen değer de hikâyenin sonu değildir. Eğer sadece bir sonraki kararı düşünmüyor ve gelecekte aynı seçeneklerle alacağınız diğer kararları da düşünüyorsanız, araştır/kullan dengesi süreçte çok büyük önem arz eder. Bu bakımdan matematikçi Peter Whittle “çok kollu canavar problemi tüm insan eylemlerinde bir çatışma şeklinde vücut bulmaktadır” demektedir.

Peki, o zaman o iki makineden hangisinin kolunu çekerdiniz? Bu hileli bir sorudur. Bu konu, şu ana kadar henüz hiç bahsetmediğimiz bir şeye dayanmaktadır. Kumarhanede ne kadar kalmayı planlamaktasınız?

Zamanı Yaşamak

Robin Williams, 1989 senesine ait *Ölü Ozanlar Derneği (Dead Poets Society)* isimli filmde “Anı yaşa (Carpe diem)” diye ısrar etmektedir. “Anı yaşayın gençler. Hayatınız sıra dışı olsun.”

Bu inanılmaz derecede önemli bir tavsiyedir. Aynı zamanda kendi kendisiyle çelişmektedir. Anı yaşamak ve bir hayat boyu yaşamak birbirinden tamamen farklı şeylerdir. “Ye, iç ve mutlu

ol çünkü yarın öleceğiz” diye bir değişimiz vardır lakin belki de bunun tam tersini söylememiz gerekir. “Yeni bir dil ya da araç kullanmayı öğrenmeye başla ve bir yabancıyla sohbet et çünkü hayat uzun ve önündeki senelerde nelerden zevk alacağını kim bilebilir?” Sevdiğimiz tecrübelerle yenilerini dengelerken bizim bunları yapmaktan hoşlandığımız zaman aralığı kadar başka hiçbir şey önemli değildir.

Veri bilimcisi (data scientist) ve blog yazarı olan, yaşamı ve işinde araştır/kullan dengesi ile haşır neşir olmuş Chris Stucchio şöyle demektedir: “Bir şehre yeni taşındığımda yeni bir restoran denemeyi, oradan ayrılacağım günlere nazaran çok daha sık yaparım. Şimdilerde bildiğim ve sevdiğim restoranlara gitmekteyim çünkü biliyorum ki çok geçmeden New York’tan ayrılacağım. Ancak buna karşın, birkaç yıl önce Hindistan’da Puna’ya taşındığımda beni öldürecekmiş gibi görünmeyen her yerde yemek yerdim. Ve oradan ayrılırken yeni şeyler denemek yerine eskiden sevdiğim mekânlara gittim... Biraz daha iyi bir yer bulmuş olsam bile, oraya sadece bir ya da iki kez giderdim. Neden riske gireyim ki?”

Yeni şeyler denemenin acı bir özelliği de yeni bir favori bulma için yapılan araştırmanın değerinin zaman içinde sadece azalacağıdır. Çünkü bunun tadını çıkarma fırsatları zaman içerisinde azalacaktır. Bir şehirdeki son gecenizde şık bir kafe bulmanız size zamanı geri döndürme şansı tanımaz.

Bunun tam tersi olarak, kullanmanın değeri zaman içerisinde sadece artabilir. Bugün bildiğiniz en güzel kafe, tanım olarak en az geçen ay itibariyle bildiğiniz en güzel kafe kadar güzeldir. (Ve eğer o zamandan bu yana başka bir favori kafeniz olduysa, o da en az o kadar güzeldir.) Bu nedenle sonuçta elde edinilen bilgiyi kullanmak için zamanınız olduğunda araştırın, para harca-

maya hazır olduğunuzda da kullanın. Zaman aralığı, stratejiyi oluşturur.

İlginç bir şekilde, zaman aralığı stratejiyi oluşturduğu için stratejiyi gözlemleyerek aynı zamanda buradan zaman aralığını da çıkarabiliriz. Örnek olarak Hollywood'u ele alalım. 1981 senesinin en fazla gişe hasılatı yapan 10 filmi arasında sadece iki tane devamı çekilen film vardı. 1991 senesinde bu sayı üçtü. 2001 senesinde ise beş. 2011 senesinde, gişe hasılatı en fazla olan 10 filmden sekizi, devamı çekilen filmlerdi. Aslında 2011 senesinde devam filmleri, başlıca film stüdyoları tarafından çıkarılan filmler arasındaki yüzdeleri bakımından rekor kırmıştı. Bunun hemen ardından 2012 senesi bu rekoru kırdı ve ertesi sene bu rekor yine kırılacaktı. Gazeteci Nick Allen 2012 Aralık ayında gelecek seneye ilgili şunları söylüyordu:

Seyircilere *X-Men* filminin altıncısına ilave olarak *Hızlı ve Öfkeli 6* (*Fast and Furious 6*), *Zor Ölüm 5* (*Die Hard 5*), *Korkunç Bir Film 5* (*Scary Movie 5*) ve *Paranormal Aktivite 5* (*Paranormal Activity 5*) sunulacak. Ayrıca *Demir Adam 3* (*Iron Man 3*), *Felekten Bir Gece 3* (*The Hangover 3*) ve *The Muppets*, *Şirinler* (*The Smurfs*), *G.I. Joe* ve *Bad Santa* filmlerinin de ikincileri seyirci karşısına çıkacak.

Bir film şirketinin bakış açısıyla devam filmleri garanti bir hayran tabanına sahip olmak demektir. Altın yumurtlayan bir tavuktur ve kullanılacaktır. Garanti olan şeylerden aşırı derecede faydalanmak demek tıpkı Stucchio şirketinin işten çekilme durumunda olması gibi, kısa vadeli bir yaklaşımı işaret eder. Bu yıl da devam filmleri yeni filmlere nazaran hit olacaktır. Peki, geleceğin sevilen devam filmleri nereden gelecek? Böylesi bir devam filmi seli sadece kötü değil (eleştirmenler açık bir şekilde

bu şekilde düşünmektedir), aynı zamanda biraz da acıdır. Tamen kullanma odaklı bir döneme girmiş olan film endüstrisi, bu zaman aralığının sonuna yaklaşmakta olduğunun sinyallerini vermektedir.

Hollywood ekonomisine bir bakış bu sezgiyi doğrulamaktadır. En büyük film şirketlerinin kâr oranları 2007 ile 2011 senesi arasında yüzde 40 oranında azalmış ve bilet satışları son 10 senenin yedisinde düşmüştür. *Economist* dergisi bununla ilgili şöyle demiştir: “Büyük film şirketleri artan fiyatlar ve düşen kârlara, tutacağını düşündükleri filmleri daha fazla çekerek karşılık vermişlerdir; devam filmleri, öncül filmler ya da tanınan isme sahip karakterlerin olduğu herhangi bir şey.” Diğer bir deyişle kumarhane onlara karşı kazanmaya başlamadan önce ellerindeki en iyi makinelerin kollarını çekmektedirler.

Kazandığın Yerde Kal

Optimal algoritmaları bulmak bize, çok kollu canavar problemiyle boğuşmanın ne kadar zor olduğunu anlatır. Aslında Peter Whittle’in belirttiği gibi “İkinci Dünya Savaşı süresince bu soruna çözüm bulma çalışması Müttefik analizcilerin enerji ve fikirlerini âdeta tüketmişti. Hatta sorun en sonunda entelektüel bir sabotaj olarak Almanların üzerine atılmıştı.”

Sorun çözümüne yönelik ilk adımlar savaşı takip eden senelerde atıldı ve Columbialı matematikçi Herbert Robbins kusursuz olmasa da iyi bir stratejinin olduğunu gösterdi.

Robbins özellikle iki kumar makinesinin olduğu durumu inceledi ve **Kazan Kal, Kaybet Değiştir (Win-Stay, Lose-Shift)** Algoritması isimli bir çözüm önerdi. Rastgele bir makine seçin ve kazandırdığı sürece devam edin. Eğer belirli bir yerden sonra kazandırmıyorsa diğer makineye geçin. Bu basit strateji tam çö-

zümnden uzak olmasına karşın Robbins, 1952 senesinde şansa bırakmaktan daha iyi bir çözüm olduğunu ispatladı.

Robbins'in ardından "kazan kal" prensibi üzerinde bir dizi çalışma daha yayınlandı. İçgüdüsel olarak bir kolu çekmeyi istiyorsanız ve bu kol size daha yeni kazandırmış ise kazandıracağı hakkındaki inancınız artar ve çekmeye daha istekli olursunuz. Aslında kazan kal stratejisi, birçok durumda araştırma ve kullanmayı dengelemenin optimal stratejisinin bir unsurudur.

Fakat kaybet değiştir stratejisi daha farklıdır. Bir kişinin her kaybettiğinde kolu değiştirmesi oldukça aceleci bir harekettir. Bir restorana yüz kere gittiğinizi ve her seferinde muhteşem bir yemek yediğinizi düşünün. Sadece bir hayal kırıklığı buradan vazgeçmek için yeterli olur muydu? İyi seçenekler, kusursuz olmadıkları için aşırı derecede sert bir şekilde cezalandırılmamalıdır.

İlginç bir şekilde kazan kal ve kaybet değiştir stratejisi optimize etmeye çalıştığınız zaman aralığı üzerinde herhangi bir etkiye sahip değildir. Eğer favori restoranınız sizi son seferinde hayal kırıklığına uğrattıysa, bu strateji size bir başka yerde yemek yemeniz gerektiğini söylemektedir: O şehirdeki son geceniz olsa bile.

Robbins'in çok kollu canavar problemi üzerine olan ilk çalışması yine de önemli bir literatür oluşmasına yol açmıştır ve araştırmacılar izleyen birkaç yılda önemli gelişme kaydetmişlerdir. RAND kuruluşunda bir matematikçi olan Richard Bellman, toplamda kaç seçenek ve fırsatımızın olduğunun önceden bilindiği durumlar için bu problemin tam çözümünü bulmuştur. Tam bilgiye sahip olunan sekreter probleminde olduğu gibi Bellman'ın sırrı, çözümde sondan başa doğru ilerlemektir: En son kol çekişi göz önüne almak ve önceki kararlara bağlı olarak tüm muhtemel sonuçlara göre hangi makinede oynamayı seçmek. Bunu belirle-

dikten sonra sondan ikinci fırsata geçersiniz, sonra bir öncekine ve böylece en başa kadar geri gelirsiniz.

Bellman'ın metodundan ortaya çıkan cevaplar kesindir ama çok fazla seçeneğin olduğu ve kumarhanede çok uzun süre kalınan durumlar çok fazla -hatta imkânsız ölçüde- çaba gerektirir. Dahası, tüm sonuçları hesaplayabilecek olsak bile her zaman ne kadar fırsatımız olacağını (ve hatta ne kadar seçeneğimiz olacağını) bilemeyebiliriz. Bu nedenlerden ötürü, çok kollu canavar problemi hâlen çözülememiştir. Whittle'ın deyimiyle “çok hızlı klasik oldu ve imkânsızlıkla birlikte anılmaya başladı.”

Gittins İndeksi

Matematik konularında olduğu gibi burada da amaç, genellemeye ulaşmaktır. Unilever şirketler grubu 1970'lerde John Gittins isimli genç bir matematikçiden bazı ilaç denemelerini optimize etmek için yardım istedi. Ancak aldıkları cevap, bir nesil boyunca çözülmemiş olarak kalacak olan matematiksel bir bilmeceydi.

Günümüzde Oxford'da istatistik hocası olan Gittins, Unilever tarafından yöneltilen soru için kafa yordu. Bir hastalığa karşı çeşitli kimyasal bileşenlerden hangisinin etkin olduğunu belirlemenin en hızlı yolu nedir? Gittins problemi elinden gelen en genel şekliyle ele aldı: Denenecek birden fazla seçenek, her bir seçenek için farklı ödül ihtimalleri ve bunlar arasında tahsis edilmesi gereken iş gücü (para ya da zaman). Bu durum elbette ki çok kollu canavar probleminin başka bir şeklidir.

Hem kâr amaçlı ilaç şirketleri hem de hizmet ettikleri tıp sektörü araştır/kullan dengesi talepleriyle sürekli olarak karşılaşmaktadır. Şirketler AR-GE kaynaklarını yeni ilaç bulmaya yatırmak isterler ama aynı zamanda mevcut kârlı ürünlerinin de devamını talep ederler. Doktorlar hastalarının ihtiyacı olan tedaviyi almaları için mevcut en iyi ilacı yazmak isterler ve aynı zamanda

daha iyi ilaçların bulunması için deneysel çalışmaları teşvik ederler.

Her iki durumda da zaman aralığının ne olması gerektiği açık bir şekilde belli değildir. Bir bakıma ilaç şirketleri ve doktorlar, birbirlerine benzer bir şekilde sonsuz gelecekle ilişkilidir. Şirketler teorik olarak sonsuza kadar piyasada bulunmayı isterler ve tıp dünyası açısından yapılacak bir buluş, daha henüz doğmamış insanlara bile yardım edecektir. Ancak içinde bulunulan zamanın daha büyük bir önceliği bulunmaktadır. Bugün tedavi edilen bir hasta, bir hafta ya da bir yıl sonra tedavi edilecek olan bir kişiden daha değerli olarak kabul edilmektedir ve aynı durum şirketlerin kâr anlayışı için de geçerlidir. Ekonomistler bu duruma, yani şimdiye gelecekte daha fazla değer verme durumuna “azalma (discounting)” demektedir.

Gittins, önceki araştırmacıların aksine çok kollu canavar problemine bu bakış açısından yaklaştı. Amacını, getirileri sabit bir zaman aralığı için maksimize etmek değil, sonsuz ancak önemi azaltılmış bir gelecek için getirileri maksimize etmek olarak belirlemişti.

Bu şekilde bir yaklaşım kendi yaşamlarımızda alışık olmadığımız bir şey değildir. Eğer 10 günlük tatil zarfında bir kasabayı ziyaret ederseniz, restoranlarla ilgili kararlarınızı aklınızda belirli bir zaman aralığı varken verirsiniz. Fakat eğer orada yaşıyorsanız bu çok anlamlı olmaz. O zaman bugün yiyeceğiniz yemeğe, yarın yiyeceğinizden daha fazla, yarın yiyeceğinize de bir sene sonra yiyeceğinizden daha fazla önem verirsiniz. Gittins kendi açısından, getirilere verilen değer geometrik olarak azalacağı varsayımında bulundu. Yani, restoranlara yaptığınız her ziyaret bir öncekinin sabit kesiri, yani fonksiyonudur. Diyelim ki herhangi bir günde bir otobüsün size çarpma ihtimalinin yüzde bir olduğunu düşünüyorsunuz. O zaman yarın akşam yemeğinin

değerini bu akşamkinin yüzde 99'u olarak değerlendirmelisiniz çünkü o yemeği yiyemeyebilirsiniz.

Geometrik olarak azalan bu varsayımla çalışan Gittins, “en azından iyi bir yaklaşım” olduğunu düşündüğü bir stratejiyi araştırdı: Çok kollu canavar probleminin her bir kolunu diğerlerinden ayrı olarak düşünmek ve o kolun değerini bulmaya çalışmak. Bunu da dâhice bir şeyle yapmıştı; rüşvet teklif etmek.

Sevilen televizyon programı “*Var mısın Yok musun (Deal or No Deal)*” yarışmasında yarışmacı, içinde bir liradan 500.000 liraya kadar değişen ödüller olan 24 kutudan birini seçer. Oyun ilerledikçe Hamdi Bey (the banker) isimli gizemli bir karakter periyodik olarak telefonla arar ve yarışmacıya kutusunu açmaması için para önerir. Çantadaki belirsiz miktarı almak yerine ne kadarlık bir ödülü kabul edeceğine karar vermek yarışmacıya kalmıştır.

Gittins (yarışmanın ilk bölümünün yayınlanmasından yıllar önce) çok kollu canavar probleminin de çok farklı olmadığını fark etmişti. Önümüzdeki kumar makineleri hakkında hiçbir şey bilmiyoruz ve her makinenin daha fazla kol çekmememizi sağlayacak bir kazanma oranı olduğunu biliyoruz. Gittins’in “dinamik atama indeksi (dynamic allocation index)” dediği ve günümüzde *Gittins İndeksi* olarak bilinen bu rakam, kumarhanede açık bir strateji önermektedir: Her zaman en büyük indeks değerine sahip kolla oynayın.*

İndeks stratejisi aslında “iyi bir yaklaşımdan” daha iyi sonuç vermiştir. Geometrik olarak azalan kazançlara sahip çok kollu canavar problemini tamamen çözmektedir. Araştırma ve kullanma arasındaki gerilim, her ikisi için geçerli tek bir değeri maksi-

* Bu bölümün özeti: Gittins’in yanında hâlen güvendeseyeniz derhâl odayı terk edin. ÇN: Yazar, *git while Gittins’s good* deyişiyle “hâlen iyiiken toz ol” anlamındaki *get (out) while gettin(g)’s good* (aynı zamanda bir şarkı sözüdür) deyimine gönderme yapmıştır.

mize etme göreviyle basit bir şekilde birleştirilebilir. Gittins bu başarı hakkında alçak gönüllüdür. “Fermat’ın Son Teoremi (Fermat’s Last Theorem) kadar iyi değil” ama araştırma/kullanma ikilemi hakkında önemli sayıda soruyu cevaplayan bir teoremdir.

Bir oyun makinesinin Gittins indeks değerini hesaplamak için makinenin geçmiş değerleri ve azalma oranının bilinmesi gerekir. Zira Gittins indeks değeri bilindiği zaman aynı türde tüm problemler için kullanılabilir. Aslında kaç tane kolun problemin içinde olduğunun da bir önemi yoktur çünkü her bir kol için indeks değeri ayrı bir şekilde hesaplanmaktadır.

Bir sonraki sayfadaki çizelgede, bir sonraki kol çekmenin getirisinin şimdiki getirinin yüzde 90’ı olduğu varsayımına dayalı olarak, dokuz başarıya kadar ve bir de başarısızlık durumuna göre Gittins indeks değerlerini vermekteyiz. Bu değerler günlük olarak karşımıza çıkan çok kollu canavar problem çeşitlerini çözmek için kullanılabilir. Örneğin, bu varsayımlar ışığında 9-6 geçmişisi olan (ve yüzde 60 beklenen değeri olan) bir makine yerine 1-1 geçmişisi olan (ve yüzde 50 beklenen değerli) makineyi tercih etmeniz gerekir. Çizelgedeki kazanma ve kaybetme koordinatları kullanılarak indeks değerlerinin, daha az oynanan makinede 0,6346, daha fazla oynanan makinede ise sadece 0,6300 olduğu görülmektedir. Sorun çözülmüştür: Bu defa şansını dene ve tekrar araştır.

Gittins indeks değerlerine bakarak başka birkaç ilginç gözlemlerde daha bulunabilirsiniz. İlk olarak kazan kal stratejisinin işe yaradığını görebilirsiniz. Herhangi bir satırda soldan sağa doğru ilerlediğinizde indeks her zaman artmaktadır. Yani, eğer bir kol çekilecek doğru kol ise ve bu çekişin sonunda kazanırsanız, (tabloda sağa doğru devam ederek) mantıklı olan tek hareket tarzı onu tekrar çekmektir. İkinci olarak kaybet değiştir stratejisi-

Kazanma

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	.7029	.8001	.8452	.8723	.8905	.9039	.9141	.9221	.9287	.9342
1	.5001	.6346	.7072	.7539	.7869	.8115	.8307	.8461	.8588	.8695
2	.3796	.5163	.6010	.6579	.5996	.7318	.7573	.7782	.7956	.8103
3	.3021	.4342	.5184	.5809	.6276	.6642	.6940	.7187	.7396	.7573
4	.2488	.3720	.4561	.5179	.5676	.6071	.6395	.6666	.6899	.7101
5	.2103	.3245	.4058	.4677	.5168	.5581	.5923	.6212	.6461	.6677
6	.1815	.2871	.3647	.4257	.4748	.5156	.5510	.5811	.6071	.6300
7	.1591	.2569	.3308	.3900	.4387	.4795	.5144	.5454	.5723	.5960
8	.1413	.2323	.3025	.3595	.4073	.4479	.4828	.5134	.5409	.5652
9	.1269	.2116	.2784	.3332	.3799	.4200	.4548	.4853	.5125	.5373

Bir sonraki kazancın şimdikinın yüzde 90'ı olacağı varsayımına dayanan, kazanma ve kaybetmenin bir fonksiyonu olarak Gittins indeksi değerleri

nin sizi nerede sıkıntıya sokabileceğini görebilirsiniz. Dokuz kazanmanın ardından gelen bir kayıp sizi 0,8695 indeksine getirir ve bu da tablodaki diğer değerlerin çoğundan hâlâ büyüktür. Yani, muhtemelen en az bir çekiş daha o kolda kalmalısınız.

Ancak tablonun belki de en ilginç kısmı, sol üstteki ilk değerdir. 0-0'lık bir geçmiş (yani, tamamen bilinmeyen bir makine) 0,50000'lik bir beklenen değere, 0,7029'luk bir indeks değerine sahiptir. Diğer bir deyişle hiçbir tecrübenizin olmadığı bir şey, yaklaşık olarak her 10 seferin yedisinde kazandıran bir makine kadar çekicidir! Dikey olarak aşağı indiğinizde 1-1'lik geçmişe sahip bir makinenin 0,6346, 2-2'lik geçmişi olanın ise 0,6010 indeksine sahip olduğuna dikkat ediniz. Eğer yüzde 50'lik başarılı bir performans devam ederse indeks en sonunda 0,50'ye yaklaşmaktadır ve makinenin aslında hiç de özel olmadığını ve daha fazla araştırma yapıldıkça verilenleri geri aldığını söyleyebiliriz.

Kazanma

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Kaybetme	0	.8699	.9102	.9285	.9395	.9470	.9525	.9568	.9603	.9631	.9655
	1	.7005	.7844	.8268	.8533	.8719	.8857	.8964	.9051	.9122	.9183
	2	.5671	.6726	.7308	.7696	.7973	.8184	.8350	.8485	.8598	.8693
	3	.4701	.5806	.6490	.6952	.7295	.7561	.7773	.7949	.8094	.8222
	4	.3969	.5093	.5798	.6311	.6697	.6998	.7249	.7456	.7631	.7781
	5	.3415	.4509	.5225	.5756	.6172	.6504	.6776	.7004	.7203	.7373
	6	.2979	.4029	.4747	.5277	.5710	.6061	.6352	.6599	.6811	.6997
	7	.2632	.3633	.4337	.4876	.5300	.5665	.5970	.6230	.6456	.6653
	8	.2350	.3303	.3986	.4520	.4952	.5308	.5625	.5895	.6130	.6337
	9	.2117	.3020	.3679	.4208	.4640	.5002	.5310	.5589	.5831	.6045

Bir sonraki kazancın şimdikinın yüzde 99'u olacağı varsayımına dayanan, kazanma ve kaybetmenin bir fonksiyonu olarak Gittins indeksi değerleri

Fakat bu yakınsama işlemi oldukça yavaş gerçekleşmektedir; bu nedenle araştırmanın ödülü kuvvetli bir güçtür. İlk seferde gerçekleşen bir başarısızlığın bile aslında 0-1 geçmiş oluşturarak Gittins'in indeksinde yüzde 50'den fazla bir değere karşılık oluşturduğuna dikkat edin.

Ayrıca, geleceğin önemini değiştirdikçe araştır/kullan dengesinin nasıl değiştiğini görebiliriz. Aşağıdaki tablo bir öncekiyle aynı bilgiyi sunmakta fakat bir sonraki kazancın şimdiki kazancın yüzde 90'ı değil, yüzde 99'u değerinde olacağını varsaymaktadır. Gelecek neredeyse şimdiyle eşit şekilde ağırlıklandırıldığına araştırmada şansının denemenin değeri, garanti bir kazancı kabul etmeye kıyasla çok daha yukarılara çıkmaktadır. Burada 0-0 geçmişi olan ve hiç denenmemiş bir makinenin kazandırma şansı yüzde 86,99'dur.

Gittins İndeksi, bu sebeplerden dolayı araştırmadan öğrenmiş olduklarımız ışığında kullanma imkânımız olduğunu varsayarak, bilinmeyi tercih etme yönünde resmi ve güçlü bir gerekçe yaratmaktadır. Eski bir özdeyiş bize “komşunun tavuğu bize kaz görünür” der ama matematik bize bunun nedenini gösterir. Bilinmeyenin daha iyi olma konusunda bir ihtimali vardır, hatta bu seçeneğin farklı olmadığını kabul etmesek veya daha kötü olma ihtimali olsa bile. Denenmemiş olan, eskisiyle aynı bile olsa denenmişten daha değerlidir çünkü hakkında daha az şey biliriz. Yeni şeyler denemek en iyiyi bulma şansımızı artıracığından dolayı bu araştırmanın kendine has değeri vardır. Bu nedenle sadece şimdiki zamana odaklanmak yerine geleceği hesaba katmak bizi yeniliğe götürür.

Gittins İndeksi bu nedenle çok kollu canavar problemine hayret verici bir şekilde doğrudan bir çözüm sunmaktadır. Fakat bu indeks, bulmaca hakkındaki araştırma kitabını tamamıyla kapatmamakta ya da günlük yaşamdaki tüm araştıır/kullan dengesine dair konularda yolumuzu bulmaya yardımcı olmamaktadır. İlk olarak, Gittins İndeksi, ancak bazı sağlam varsayımlar altında geçerlidir. Gelecekteki kazanımın geometrik olarak azalmasına, her kol çekişin bir öncekinin fonksiyonuna göre değerlendirilmesine (bu hususta yapılan bazı davranışsal ekonomi ve psikoloji araştırmalarına göre insanlar bunu yapmaz) dayalıdır. Ve eğer seçenekler arasında geçiş yapmanın bir maliyeti varsa, Gittins stratejisi artık optimal değildir. Belki de daha önemlisi, Gittins İndeksini sürekli olarak hesaplamak çok zordur. Akşam yemeği seçeneklerinizi optimize edebileceğiniz bir indeks tablosunu yanınızda taşısanız bile buna harcayacağınız zaman ve çabaya yazık olur. (“Bekleyin, ben bu sorunu çözebilirim. O restoran 35 seferin 29’unda çok iyiydi ama diğeri 16’nın 13’ünde iyiydi, bu nedenle Gittins indeks değerleri... Hey, herkes nereye gitti?”)

Gittins İndeksinin geliştirilmesinden bu yana kadar geçen zamanda bu tarz endişeler, bilgisayar mühendislerini ve istatistikileri çok kollu canavarla ilgilenmek için daha basit ve daha esnek stratejiler aramaya sevk etmiştir. Bu stratejiler insanların Gittins İndeksini hesaplamalarından daha kolaydır ve oldukça iyi performans sergilemektedir. Aynı zamanda hangi şansımızı kullanacağımıza dair olan kararlara ait en büyük insani korkularımızdan biriyle ilgilenir.

Pişmanlık ve İyimserlik

Pişmanlıklar mı? Evet, birkaç pişmanlığım oldu. Lafı edilemeyecek kadar az.

—Frank SINATRA

Kendime göre, iyimser biriyim ama iyimserliğim çok işime yaramıyor.

—Winston CHURCHILL

Eğer Gittins İndeksi çok karmaşıksa ya da geometrik azalmayla tanımlanan bir durumda değilseniz, bir başka seçeneğiniz daha vardır: *Pişmanlığa* odaklanın. Ne yiyeceğimizi, kiminle zaman geçireceğimizi ya da hangi şehirde yaşayacağımızı seçtiğimiz zaman, birçok iyi seçenek üzerinde pişmanlık bulutu dolaşır ve yanlış tercihten dolayı kendinize işkence etmeniz pek muhtemeldir. Bu pişmanlıklar genellikle yapamadığımız, asla denemediğimiz şeyler hakkındadır. Yönetim teorisyeni Chester Barnard'ın akıllarda yer etmiş sözlerine değinirsek, “Denemek ve başarısız olmak en azından öğrenmek demektir, denememek ise neler olabileceğinin tahmin edilemeyen kaybından dolayı daha baştan zarar görmektir.”

Pişmanlık aynı zamanda motive edici olabilir. Jeff Bezos Amazon.com’u kurmaya karar vermeden önce New York’taki D. E. Shaw & Co. şirketinde iyi ve dolgun maaşlı bir pozisyonda çalışmaktaydı. Seattle’da bir çevrim içi kitapçı açmak büyük bir adımdı. Patronu (D. E. Shaw) ona dikkatlice düşünmesini tavsiye etmişti. Bezos, bu konuyla ilgili şöyle demektedir:

Benim bulduğum, karar vermeyi inanılmaz derecede kolaylaştıran sisteme, sadece bir bilgisayar tutkununun takacağı bir isim olan “pişmanlığı minimize etme sistemi” taktım. Çünkü 80 yaşına geldiğimde, “Oh, hele şükür! Hayatım boyunca yaşamış olduğum pişmanlık sayısı ne kadar da az” demek istiyorum. 80 yaşına geldiğimde çok önemli olacağını bildiğim internet denen şeye katıldığım için pişman olmayacağım. Bu sistemde başarısız olursam, yine de pişman olmayacağım. Pişman olabileceğim tek şey, bunu hiç denememiş olmak. Bu pişmanlığın her gün peşimi bırakmayacağını bildiğim için bu kararı vermek inanılmaz derecede kolay oldu.

Bilgisayar bilimi size, hiç pişmanlığı olmayan bir yaşam sağlayamaz. Ancak size muhtemelen tam da Bezos’un aradığı şeyi sunabilir: *Minimum* sayıda pişmanlık içeren bir yaşam.

Pişmanlık gerçekte yapmış olduğumuz ile olabilecek en iyi şeyin sonradan karşılaştırılmasıdır. Çok kollu canavar probleminde Barnard’ın “tahmin edilemez kaybı” aslında tam olarak ölçülebilir ve pişmanlığa da rakamsal bir değer atanabilir. Pişmanlık, belirli bir stratejiyi takip etmenin getirisi ile her seferinde en iyi kolu çekmenin (en iyisinin hangisi olduğunu en baştan itibaren bilseydik) teorik olarak toplam getirisi arasındaki farktır. Farklı stratejiler için de bu değeri hesaplayabiliriz.

Herbert Robbins 1985 senesinde, Kazan Kal, Kaybet Değiştir üzerine olan ilk çalışmasından 30 sene sonra, çok kollu canavar problemi için ikinci bir şans kullandı. O ve Columbia Üniversitesi'nden meslektaşı Tze Leung Lai pişmanlık konusunda bazı önemli noktaları ispatlamayı başardı. Birincisi, her şeyi bilmediğiniz varsayıldığında toplam pişmanlık miktarınızın artışı, en iyi stratejiyi seçerseniz bile muhtemelen durmayacaktır. Çünkü en iyi strateji bile her seferinde kusursuz değildir. İkinci olarak, pişmanlık en iyi stratejiyi seçtiğinizde, diğer stratejileri seçmiş olma durumunuza nazaran daha yavaş bir oranda artacaktır. Dahası, iyi bir strateji ile pişmanlığın büyüme oranı zaman içerisinde sorun hakkında siz daha fazla şey öğrendikçe ve daha iyi kararlar alma yeteneğiniz arttıkça azalacaktır. Üçüncü olarak ve en önemlisi, muhtemel minimum pişmanlık -yine her şeyi bilmediğimiz varsayımı altında- kolun her çekilişinde *logaritmik* olarak artan pişmanlıktır.

Logaritmik olarak artan pişmanlık; yüz kol çekişimizin ilk onunda, kalan doksan seferden daha çok ve on yılın ilk senesinde kalan dokuz yıldan daha çok hata yapacağımız anlamına gelmektedir. (İlk on yılın hataları da buna paralel olarak yüz yılın kalan doksan yılından daha çok hata içerecektir.) Bu tesellinin bir ölçüsüdür. Bir gün hiç pişmanlığımızın olmayacağını gerçekte bekleyemeyiz. Ancak eğer pişmanlığı minimize eden bir algoritma takip ederseniz, her yıl bir öncekinden daha az sayıda yeni pişmanlığımız olmasını bekleyebiliriz.

Lai ve Robbins ile başlayarak son yıllarda araştırmacılar, minimum pişmanlığı elde edecek algoritmaların arayışında olmuşlardır. Buldukları algoritmalar içerisinde en popüler olanları **Üst Güven Sınırı (Upper Confidence Bound)** algoritmalarıdır.

İstatistiklerin görsel gösterimleri genellikle herhangi bir veri noktasını aşan ya da altında kalan ve ölçümdeki belirsizliğe işa-

ret eden hata çubukları denilen çubukları içermektedir. Hata çubukları ölçülen değerin gerçekte alabileceği makul değer aralıklarını gösterir. Bu aralık “güven aralığı” olarak bilinmektedir ve bir şey hakkında daha fazla veri topladıkça güven aralığı daralacak ve gittikçe artan kesinlikte bir değerlendirmeye işaret edecektir. (Örneğin her iki kol çekişin birinde kazandıran bir kumar makinesinin güven aralığı, aynı beklenen değere sahip, on seferin beşinde kazandıran bir makineye oranla daha geniş olacaktır.) Çok kollu bir canavar probleminde üst güven sınırı algoritması, basit olarak güven aralığındaki en yüksek olan seçeneği seçmemizi söylemektedir.

Bu nedenle Üst Güven Sınırı Algoritmaları da tıpkı Gittins İndeksi gibi, çok kollu canavarın her koluna bir sayı atamaktadır. Ve bu sayı, eldeki mevcut bilgiye dayanılarak, kolun makul bir şekilde alabileceği en üst değere eşitlenir. Yani, üst güven sınırı algoritması o ana kadar hangi kolun en iyi performansla *sahip olduğuyla* ilgilenmez. Gelecekte *muhtemelen* en iyi performansı sergileme ihtimali olan kolu seçer. Örneğin bir restorana daha önce hiç gitmediyseniz, restoran hakkında bilebileceğiniz tek şey harika olabileceğidir. Oraya bir ya da iki kez gitmiş olsanız ve birkaç yemeği denemiş olsanız bile sizin genelde favoriniz olan bir mekândan daha iyi olabileceği ihtimalinin üzerini çizmeye yetecek kadar bilgiye sahip olmayabilirsiniz. Üst güven sınırı algoritmaları da Gittins İndeksi gibi, her zaman beklenen değerden daha büyüktür. Fakat aradaki fark bir seçenekle ilgili tecrübe ve bilgimiz arttıkça azalır. (Orta derecede iyi tek değerlendirmeye sahip bir restoran hâlen yüzlerce değerlendirmesi olan bir restorana nazaran daha iyi olma potansiyelini elinde bulundurmaya devam eder.) Üst Güven Sınırı Algoritmaları tarafından verilen tavsiyeler Gittins İndeksi tarafından sağlananlara benzer

olacaktır lakin bunları hesaplamak çok daha kolaydır ve geometrik azalma varsayımını gerektirmezler.

Üst Güven Sınırı Algoritmaları “belirsizlik karşısında iyimserlik” olarak adlandırılan bir prensibi uygulamaktadırlar. İyimserliğin kusursuz bir şekilde mantıklı olabileceğini göstermektedirler. Bir seçeneğin, o ana kadar elde edilen tüm kanıtlar değerlendirildiğinde olabileceği en iyi hâline odaklanarak bu algoritmalar, en az bilgi sahibi olduğumuz ihtimalleri artırırılar. Sonuç olarak karar verme sürecine doğal bir şekilde bir miktar araştırma eklerler ve yeni seçeneklere heyecanla atlanmasını sağlarlar çünkü bu yeni seçeneklerden herhangi biri bir sonraki en iyi şey olabilir. Aynı prensibi, etraflarındaki alanı haritalandırılmamış bölgelerin değerlerini artırarak keşfeden “iyimser robotlar” üreten MIT’den Leslie Kaelbling de kullanmıştır. Ve bunun açık bir şekilde insan yaşamları üzerinde etkisi bulunmaktadır.

Üst Güven Sınırı Algoritmalarının başarısı, esasen bu varsayımın doğruluğunun resmi ispatıdır. Bu algoritmaların verdiği tavsiyeleri izleyerek yeni kişilerle tanışma ve yeni şeyleri keşfetme konusunda heyecanlanmalısınız. Çünkü aksine bir kanıt olmadıkça onlar hakkında en iyiyi varsayarsınız. İyimserlik uzun vadede pişmanlıktan korunmada en iyi araçtır.

Çevrim İçi Canavarlar

2007 senesinde Google ürün yöneticisi Dan Siroker, o zamanlar senatör olan Barack Obama’nın Chicago’daki başkanlık seçim kampanyasına katılmak için izin aldı. New Media Analytics isimli bir ekibin başında olan Siroker, kampanyanın parlak kırmızı “BAĞIŞ YAP” düğmesini, Google analitik uygulamalarından birini kullanarak hayata geçirdi. Sonuç için muhteşemden başka bir şey söylenemezdi. Çalışmasının doğrudan sonucu olarak 57 milyon dolar ilave gelir sağlandı.

Tam olarak o düğmeye ne yapmıştı?

A/B testine tabi tutmuştu.

A/B testi şu şekilde işlemektedir: Bir şirket belirli bir sayfanın farklı şekillerini hazırlar. Belki farklı renk ya da resimleri dener, belki de bir haber başlığı için farklı başlıkları ya da ekrandaki nesnelerin farklı şekilde düzenlenmiş hâllerini. Daha sonra sayfaya gelen ziyaretçileri rastgele olacak şekilde bu versiyonlara, genellikle eşit sayıda dağıtırlar. Bir kullanıcı kırmızı bir düğme görür, diğeri ise mavi görebilir ya da bir kişi “BAĞIŞ YAP” yazısını görürken diğeri “KATKIDA BULUN” yazısını görür. Daha sonra ilgili ölçütler (örneğin tıklanma oranı ya da kullanıcı başına elde edilen gelir) gözlemlenir. Bir süre sonra eğer istatistiksel olarak anlamlı etkiler gözlenirse “kazanan” versiyon genellikle sabitlenir ya da bir başka deney için kontrol grubu hâline gelir.

Obama’nın bağış sayfası açısından bakıldığında Siroker’ın A/B testleri oldukça aydınlatıcıydı. Kampanya sayfasına ilk defa gelen ziyaretçiler için “BAĞIŞTA BULUN VE HEDİYE KAZAN” düğmesi, hediyelerin kargo masrafları bağışçıya ait olmasına rağmen en iyi performansa sahip oldu. Uzun zamandır kampanyaya mektupla destek veren ve hiç para bağışlamamış kişiler içinse “LÜTFEN BAĞIŞTA BULUNUN” düğmesi en iyi performansa sahip olmuştu. Bunu belki de suçluluk duygusundan dolayı yapmışlardı. Geçmişte bağış yapmış kişiler için ise “KATKIDA BULUN” düğmesi işe yaramıştı. Buradaki mantık belki de, daha önceden “bağış yapmış” kişilerin her zaman daha fazla “katkıda bulunabilecekleriydi.” Ve tüm durumlarda, Obama ailesinin basit bir siyah beyaz fotoğrafı, kampanya ekibini şaşırtacak bir şekilde diğer tüm fotoğraf ve videoları geride bırakmıştı. Tüm bu bağımsız optimizasyonların net etkisi devasa olmuştu.

Son on sene içerisinde interneti kullandıysanız, başka kişi veya kişilerin araştır/kullan probleminin bir parçası olmuş olabilirsiniz. Şirketler araştırma ve kullanma konusunda kendisine en fazla kazandıran kişilerin yanı sıra bununla eş zamanlı olarak kendisine en fazla para kazandıran şeyleri keşfetmek ister. Amazon ve Google gibi büyük teknoloji şirketleri 2000 senesinden başlamak üzere kullanıcıları üzerinde canlı A/B testleri uygulamaya başladı ve takip eden senelerde internet dünyanın en büyük kontrollü deney alanı hâline geldi. Bu şirketler neleri araştırıyor ve neleri kullanıyorlardı? Cevabı tek kelimedir; sizi. Yani, fare-nizi hareket ettirip kesenizin ağzını açmanıza ne neden oluyorsa onu.

Şirketler internet sitelerindeki gezinme seçeneklerini, konu başlıklarını, pazarlama e-postalarının zamanlamalarını ve hatta bazen gerçek özellik ve fiyatlarını A/B testine tabi tutmaktadır. Google arama algoritması ile Amazon alışveriş ve ödeme akışında şimdilerde anlatılmayan ve anlaşılamayacak kadar küçük test kombinasyonları vardır. (Google 2009 senesinde araç çubuklarından biri için 41 çeşit mavi tonunu test etmiştir). Bazı durumlarda herhangi iki kullanıcının aynı tecrübeyi yaşaması bile mümkün olmamaktadır.

Facebook veri grubunun eski yöneticisi veri bilimci Jeff Hammerbabacher, *Bloomberg Businessweek*'e verdiği bir demeçte “neslimin en parlak zekâları insanların reklamlara nasıl tıklayabilecekleri üzerine kafa yormaktadır” demişti. Hammerbabacher'ın konuyla ilgili görüşü, bu çeşit şeylerin kötü olduğu yönündedir. Ancak kimin bu konuda ne düşündüğünden bağımsız olarak internet, pazarlamacıların daha önceden hayal bile edemedikleri bir beğenme/tıklanma biliminin deneysel uygulamasına imkân tanımaktadır.

Elbette ki 2008 seçimlerinde Obama'ya ne olduğunu biliyoruz. Peki, onun analitiklerini yöneten Dan Siroker'a ne oldu? Obama koltuğa oturduktan sonra Siroker batıya, California'ya döndü ve Google'dan arkadaşı Pete Koomen'le birlikte web siteleri optimizasyon şirketi Optimizely'yi kurdu. 2012 başkanlık seçimiyle birlikte şirketin müşterileri arasında hem Obama'nın yeniden seçilmesi kampanyası, hem de rakip Cumhuriyetçi aday Mitt Romney kampanyaları yer almaktaydı.

A/B testi, yoğun olarak kullanılmasının üzerinden yaklaşık on yıl kadar bir zaman geçtikten sonra artık gizli bir silah değildi. İşletmelerin ve siyasetin etkin bir şekilde yönetildiğinden emin olmak için kullanılan ana parçalardan biri olarak sistemlerde yer edinmişti. İnternet tarayıcınızı açtığınızda gördüğünüz renklerin, resimlerin, yazıların ve hatta fiyatların -ve kesinlikle reklamların- kendisini size göre ayarlamakta olan bir araştır/kullan algoritmasından geldiğinden emin olabilirsiniz. Bu özel çok kollu canavar probleminde siz kumar oynayan kişi değilsiniz; siz büyük ödölsünüz.

A/B testi süreci zaman içerisinde giderek artan bir şekilde iyileştirilmiştir. En çok kabul gören A/B test yapısı -iki seçenek arasında trafiği eşit bir şekilde bölmek, belirli bir zaman periyodu için testi işletmek ve bundan sonra da tüm trafiği kazanan seçeneğe yönlendirmek- problemi çözmek için en iyi algoritma olmak zorunda değildir çünkü bu test kullanıcıların yarısının test sürdüğü sürece daha düşük kalitede olan seçenekte takılıp kaldıkları anlamına gelmektedir. Ve daha iyi bir yaklaşım bulmanın ödülleri muhtemelen oldukça yüksektir. Google'ın yıllık yaklaşık 50 milyar dolarlık gelirinin yüzde 90'ından fazlası ücretli reklamlardan gelmektedir ve çevrim içi ticaret her yıl yüzlerce milyar dolarlık hacme sahiptir. Bunun anlamı, araştır/kullan algoritmalarının interneti etkin bir şekilde hem ekonomik, hem de

teknolojik olarak güçlendirdiğidir. Kullanılacak en iyi algoritmalar üzerinde, mümkün olan her işletme senaryosuna göre araştırma ve kullanmayı dengelemek için optimal yolu arayan rakip istatistikçiler, mühendisler ve blog sahipleri vardır ve birbirleriyle amansız bir yarış hâlinde dirler.

Araştırma/kullanma probleminin çeşitli anlamları üzerinde keskin ayrımları tartışmak size delice gelebilir. Aslında, bu farklılıklar yaygın bir şekilde önem arz eder ve konu sadece başkanlık seçimleri ya da internet ekonomisi değildir.

Konu aynı zamanda insanların yaşamlarıdır.

Klinik Deneyler

1932 ile 1972 seneleri arasında Alabama, Macon County’de, Tuskegee Frengi Çalışması olarak bilinen ve ABD Kamu Sağlığı Kurumu tarafından yürütülen kırk yıllık bir deneyin parçası olarak, frengi hastası olan yüzlerce Afrika kökenli Amerikalı erkek kasten tedavi edilmiyordu. Kamu Sağlığı Kurumu çalışanlarından Peter Buxtun, 1966 senesinde bir şikâyet başvurusunda bulundu. 1968 senesinde ikinci kez şikâyetinde bulundu. Ancak bu hikâye 25 Temmuz 1972’de *Washington Star*’da yayınlanana kadar duyulmadı ve ertesi gün *New York Times*’ta baş sayfada kendisine yer buldu. ABD hükümeti en nihayetinde çalışmaya son verdi.

Kamuoyundaki bu eleştirilerin (ve aynı zamanda Kongre oturumlarında konuşulan konunun) ardından gelen hareket, tıbbi etik konusundaki prensip ve standartları resmileştirmek adına bir girişim başlatmak oldu. Maryland kırsalında yer alan Belmont Konferans Merkezi’nde kurulan bir komisyon, Belmont Raporu’nu 1979’da yayınladı. Belmont Raporu, Tuskegee deneylerinin -tıbbın hastalara karşı yerine getirmesi gereken görevlerini kötü ve kesin bir şekilde ihlalinin- bir daha tekrarlanmaması için

tıbbi deneylerin etik uygulamalarının esaslarını belirlemektedir. Aynı zamanda diğer birçok durumda çizginin nerede çizilmesi gerektiğinin belirlenmesi konusundaki zorluğa da dikkat çekmektedir.

Raporda şu ifade yer almaktadır: “Hipokrat yeminindeki ‘zarar verme’ ifadesi tıbbi ahlakın çok uzun zamandır temel ögesi olmuştur. [Fizyoloji uzmanı] Claude Bernard bunu araştırma âlemini kapsayacak şekilde genişletmiş ve birçok kişinin faydasına bile olsa bir kişiye zarar verilmemesi gerektiğini söylemiştir. Fakat zarar vermekten kaçınmak, neyin zararlı olduğunu bilmeyi gerektirir ve bu bilgiyi öğrenme sürecinde insanlar zarar görme riskine maruz kalabilmektedir.”

Belmont Raporu bu nedenle, bir kişinin eldeki bilgiyle hareket etmesi ve daha fazlasını toplama arasındaki gerilimi çözmekte lakin kabul etmektedir. Aynı zamanda bilgi toplamının tıp ahlakının bazı yanlarının askıya alınabilecek kadar değerli olabileceğini de açıkça ortaya koymaktadır. Yeni ilaç ve tedavilerin klinik testlerinin genellikle riski minimize etmek için yapıldığına ve bu nedenle bazı hastalara zarar verme riskini gerektirdiğine dikkat çekmektedir.

İyilik prensibi her zaman o kadar da belirgin değildir. Örneğin, çocuk hastalıkları üzerine araştırmaya katılan çocuklar için kısa dönemde bir iyilik beklentisi olmaksızın minimumdan daha fazla risk taşıyan araştırmalar hakkında zor bir etik problemi hâlen bulunmaktadır. Bazı kişiler bu tarz araştırmaların kabul edilemez olduğunu ileri sürerken diğerleri de bu sınırlamaların gelecekte birçok çocuk için büyük faydalar vadeden araştırmaların engellenmesine neden olacağına işaret etmişlerdir. Tüm zorlu durumlarda olduğu gibi burada da fay-

dalı olma prensibi konusunda ileri sürülen görüşler çatışabilecek ve zorlu kararlara neden olabilecektir.

Belmont Raporu'ndan bu yana geçen onlarca yıllık sürede ortaya çıkan temel sorulardan biri klinik deneyleri icra etmeye yönelik standart yaklaşımın gerçekten hastalar için riski minimize edip etmediğidir. Geleneksel bir klinik deneyde hastalar gruplara ayrılır ve her gruba çalışma boyunca alacağı bir tedavi yöntemi tahsis edilir (Sadece istisnai durumlarda çalışmalar erken bitirilir). Bu prosedür, denemedeki her hastaya en iyi tedaviyi sağlamak yerine hangi tedavinin kesin bir şekilde diğerlerinden daha iyi olduğu sorusunu cevaplamaya odaklanır. Çalışmalar bu şekilde bir internet sitesinin A/B testinin işleyişine benzer; kişilerin belirli bir kısmının çalışma sırasında, diğerlerine daha üstün gelecek olan bir tecrübe yaşayacak olması. Doktorlar da teknoloji şirketleri gibi hangi seçeneğin daha iyi olduğu hakkında bazı bilgileri denemeler devam ettiği sırada edinirler: Sadece denemelerden sonra bundan faydalanacak gelecekteki hastalar için değil, aynı zamanda hâlihazırda deneylerin içinde yer alan sonuçları iyileştirmek için kullanılabilecek bilgiler.

Bir internet sitesinin optimal tasarımını bulma deneylerinde milyonlarca dolar tehlikededir ama klinik deneylerde optimal tedavileri bulma deneylerinin doğrudan ölüm sonucu bulunmaktadır. Ve giderek artan sayıda doktor ve istatistikçi, bunu yanlış şekilde yaptığımızı düşünmektedir. Bir dizi tedavi seçeneğini tıpkı çok kollu canavar probleminde olduğu gibi ele almalıyız ve bir deney devam etmekte olsa bile insanlara daha iyi tedavileri vermeyi denemeliyiz.

Şimdilerde Harvard'da görev yapan bioistatistikçi Marvin Zelen, 1969 senesinde “adaptif (uyarlamalı)” deneyler icra etmeyi önermiştir. Önerdiği fikirlerden biri rastgele “kazanana oyna”

algoritmasıydı; belirli bir tedavi yönteminin kullanılma şansının her bir kazanma durumunda arttığı, her bir kayıpta ise azaldığı bir Kazan Kal, Kaybet Değiştir stratejisi versiyonu. Zelen'in önerisinde deneyinize, içerisinde her tedavi seçeneği için bir top olan şapkayla başlarsınız. İlk hasta için tedavi şekli şapkadan rastgele seçilen bir topla belirlenir (top daha sonra tekrar şapkaya bırakılır). Eğer seçilen tedavi başarılı olursa şapka içerisine o tedavi yöntemi için bir top daha koyarsınız. Artık şapkanın içinde ikisi başarılı tedavi yöntemine ait olmak üzere üç top vardır. Eğer tedavi başarısız olursa o zaman da şapkanın içine diğer tedavi için bir top koyarsınız ve böylece diğer alternatifin seçilme şansını artırmış olursunuz.

Zelen'in algoritması ilk olarak 16 yıl sonra, yenidoğanlardaki solunum yetmezliğini tedavi etmek için kullanılan "ECMO" (Ekstrakorporal Membran Oksijenizasyonu) çalışmalarından birinde kullanılmıştı. 1970'lerde Michigan Üniversitesi'nden Robert Barlett tarafından geliştirilmiş olan ECMO esnasında, kana oksijen verilen bir makine marifetiyle akciğerlere giden kan vücut dışına alınır ve daha sonra tekrar kalbe yönlendirilir. Kendi risklerini (aralarında embolinin de olduğu) taşıyan sert bir tedavi yöntemidir ama başka hiçbir seçeneğin kalmadığı durumlar için en azından bir alternatiftir. 1975 senesinde ECMO California, Orange County'de bir ventilatörün bile yeterli oksijen sağlayamadığı yenidoğan bir kız çocuğunun hayatını kurtardı. O bebek, şimdi 40'ıncı yaş gününü kutluyor ve bir anne. Ancak ECMO teknolojisi ve prosedürü ilk günlerinde aşırı derecede deneysel olarak değerlendirilmekteydi ve yetişkinler üzerinde yapılan ilk çalışmalar, geleneksel tedavilerle kıyaslandığında hiçbir faydası yokmuş gibi görünmekteydi.

1982 senesinden 1984'e kadar Bartlett ve Michigan Üniversitesi'ndeki meslektaşları solunum yetersizliği olan yenidoğanlarla

bir çalışma yaptılar. Ekip “kanıtlanmamış ancak muhtemelen hayatları kurtaracak bir tedaviyi engelleme hususundaki etik soruna” değinme konusunda açıktı ve “farklı hastalara, geleneksel tedavi tekniğine uymak adına hayat kurtaran bir tedaviyi verme konusunda isteklilerdi.” Bu nedenle ekip Zelen’in algoritmasını kullandı. Stratejinin sonucunda “geleneksel” tedavinin tahsis edildiği bir bebek yaşamını yitirirken ardı ardına deneysel ECMO tedavisi tahsis edilen 11 bebek hayatta kalmıştı. Çalışma sonlandıktan sonra 1984 senesinin Nisan ve Kasım ayları arasında 10 bebek daha ECMO tedavi kriterlerini karşıladı. Sekizi ECMO ile tedavi edildi ve hepsi hayatta kaldı. Diğer iki bebek ise geleneksel yöntemle tedavi edildi ve yaşamını yitirdi.

Bunlar oldukça çarpıcı rakamlardır. Fakat Michigan Üniversitesi’nin ECMO üzerine çalışmasının tamamlanmasından kısa bir süre sonra çalışma âdeta batağa saplandı. Bir deneysel çalışmada geleneksel yöntem uygulanan çok az sayıda hasta olmasından dolayı standart metodolojiden sapan prosedür de oldukça şiddetli ve riskli bir yöntemdi. Çalışma hakkındaki makalenin yayınlanmasından sonra Harvard Kamu Sağlığı Okulu’nda bioistatistik profesörü olan Jim Ware ve meslektaşları, verileri dikkatli bir şekilde incelediler ve “ECMO’nun daha ileri düzey çalışmalarda rutin olarak kullanımını onaylamadıkları” sonucuna ulaştılar. Bu nedenle Ware ve arkadaşları, hastalar üzerindeki etkili tedavi hakkında bilgi edinme dengesini sağlamaya çalışan ve daha az radikal bir tasarım kullanan ikinci bir klinik deney tasarladılar. Hastaları ECMO ya da geleneksel yöntemle rastgele tahsis edeceklerdi ve bunu gruplardan birinde daha önceden belirlenen sayıda ölüm vakası gerçekleşene kadar sürdüreceklardı. Daha sonra ise çalışmada yer alan tüm hastaları daha etkin olan tedavi yöntemine aktaracaklardı.

Ware'in çalışmasının ilk aşamasında geleneksel tedavi uygulanan her on bebekten dördü yaşamını kaybetti ve ECMO tedavisi uygulanan on bebekten dokuzu ise hayatta kaldı. Dört bebeğin ölümü, çalışmanın ikinci aşamaya geçmesi için yeterli oldu ve bu aşamada ECMO ile tedavi alan 20 hastanın 19'u hayatta kaldı. Ware ve meslektaşları "Rastgele hasta ataması yapmayı daha fazla savunmanın etik olarak çok zor olduğu" sonucuna ulaşarak ikna oldular.

Ancak bazı kişiler Ware'in çalışmasından *önce* bunun farkındaydı ve bunu sesli bir şekilde dile getirmekteydi. Eleştirenler arasında çok kollu canavar probleminde dünyanın önde gelen uzmanlarından olan Don Berry de vardı. *Statistical Science* dergisinde Ware'in çalışmasıyla birlikte yayınlanan bir yazının yorumunda Berry şöyle yazmıştı: "Hastaları Ware'in çalışmasında olduğu gibi rastgele bir şekilde ECMO olmayan tedaviye atamak ahlaki değildi... Bana göre Ware çalışması hiç yapılmamalıydı."

Ve ayrıca bunlara rağmen Ware'in çalışması yine de tüm tıp çevreleri için kesin sonuca ulaştıran bir çalışma olmamıştı. 1990'larda ECMO üzerine bir çalışma daha yapıldı ve İngiltere'de yaklaşık 200 yenidoğan bebek çalışma kapsamına alındı. Adaptif algoritma uygulamak yerine bu çalışma bebekleri rastgele ikiye bölen geleneksel metotları takip etti. Araştırmacılar "ECMO'nun faydası, mevcut kanıtların farklı yorumlanması nedeniyle tartışmaya açıktır" diyerek hareket tarzlarını haklı çıkarmaya çalıştılar. Sonuçta İngiltere'deki iki tedavi arasındaki farklılığın Amerika'da yapılan çalışmayla aynı olduğu ortaya çıktı ancak sonuçlar yine de "Daha önceki çalışmaların ışığında ECMO destekli yaklaşım ölüm riskini azaltmaktadır" diye açıklanmıştı. Peki, bu bilginin bedeli ne olmuştu? ECMO tedavisi alan hastalar grubunda ölen 24 kişinin "geleneksel" tedavi alan grupta yaşamını yitirmiş olması.

Adaptif klinik deneylerden gelen sonuçları kabul etmede yaygın olan zorluk akıl almaz niteliktedir. Ancak istatistik biliminin ilerlemesinin tıp dünyası için 20'nci yüzyılın başlarında yaptıklarının, bu bilimi doktorların her yeni tedavi yöntemi için birbirlerini ikna eden bir alandan hangi kanıtın önemli, hangisinin önemli olmadığı konusunda açıklamaları olduğu bir alana dönüştürmesi olduğunu göz önüne alınız. Kabul edilen standart istatistik uygulamalardaki değişimin bu dengeyi en azından geçici olarak bozma eğilimi bulunmaktadır.

ECMO hakkındaki tartışmalardan sonra Don Berry Minnesota Üniversitesi İstatistik Bölümünden, çok kollu canavarlar üzerine çalışılarak geliştirilen metotları çeşitli kanser tedavileri için klinik deneyler tasarlamada kullandığı Houston'daki Anderson Kanser Merkezi'ne geçti. Hâlen klinik deneylerin rastgele yapılmasının karşısında yer almakta ve bu konuda sesini çıkarmaktadır. Ayrıca yalnız da değildir. Son yıllarda uğruna mücadele ettiği fikirler sonunda yaygınlaşmaya başlamıştır. FDA 2010 Şubat ayında, “İlaç ve Biyolojik Araştırmalar İçin Adaptif Klinik Deney Tasarımı” isimli bir “rehber” yayınladı. Rehber uzun süre sadık kaldıkları bir seçeneğe rağmen en sonunda alternatifleri keşfetmeye niyetli olduklarını göstermektedir.

Hareketli Dünya

Çok kollu canavar problemlerinin içine girdiğinizde, bu tür problemlerin aslında yaşamımızın her yerinde olduğunu kolayca fark edersiniz. Şimdi verdiğimiz kararların gelecekte vereceğimiz kararlara hiçbir etkisinin olmaması nadir karşılaşılan bir durumdur. Bu nedenle optimal duraklama probleminde yaptığımız gibi insanların bu tür problemleri nasıl çözdüğünü sorgulamak oldukça doğaldır. Psikologlar ve davranışsal ekonomistler tarafından

laboratuvar ortamında yaygın bir şekilde araştırılmış bir konudur.

İnsanlar genel olarak araştırmaya daha fazla eğilimlidir ve böylece yeni olanı en iyi olana tercih ederler. Amos Tversky ve Ward Edwards bu olguyu 1966'da yayınlanan yazılarında basit bir deneyle anlatmıştı. Bu deneyde insanlara, üzerinde lambaların olduğu kutular gösterilmiş ve lambaların ne kadar süre açık kalacağını gözlemlemek deneklere bırakılmıştı. 1.000 defa lambalar rastgele yakılacaktı ve bu esnada denekler, lambaların hangisinin yanacağı üzerine birbirleriyle iddiaya girecekti. Denekler, bu süre zarfında ister lambaları gözlemleyerek isterse gözlemlemeden tahminde bulunabilecekti. (Daha alışılmış canavar problemi yapısından farklı olarak burada kişi hem oynayıp hem de gözlem yapacağı "kol çekme" hareketinde bulunamaz, katılımcı tahminlerinin doğru olup olmadığını oyun sonunda öğrenir). Bu deney, öğrendiğiniz bilgiyi nasıl kullandığınızı test ettiğiniz, araştırma ve kullanmanın saf bir uygulamasıdır. İnsanlar çoğunlukla bir süre gözlemleyip daha sonra tahminde bulunmak gibi akla yatkın hareket tarzını uygulamışlardı ama gözlem yapmaları gereken süreden daha fazlasını bahse girmek için harcamışlardı. Peki, gözlem yapmaları gereken süre ne kadar olmalıydı? Deneylerden birinde lambalardan biri tüm deney zamanının yüzde 60'ı, diğeri ise yüzde 40'ı kadar yanmıştı. Böylece lambaların açık kaldığı sürelerin arasındaki farkı insanlar kolay kolay ayırt edemeyecekti. Bu deneyde katılımcılar, ortalama olarak 505 sefer gözlemde bulunmuş, 495 sefer de bahse girmişlerdi. Matematik bilimi ise bize sadece 38 gözlemden sonra bahislerimize başlamamızı ve 962 sefer şansımızı denememizi söylemektedir.

Başka çalışmaların sonunda da benzer sonuçlar elde edildi. Wharton'dan araştırmacılar Robert Meyer ve Yong Shi,

1990’larda insanlara biri bilinen, diğeri ise bilinmeyen bir olasılığa sahip iki seçenek arasında tercihte bulunma şansı verilen bir çalışma yürüttüler. Bu olasılıklar, biri zamanında hareket etme oranı bilinen bir hava yolu şirketine, diğeri de bu konuda herhangi bir kaydı olmayan yeni bir hava yolu şirketine ait olasılıklardı. Zamanında varış sayısını maksimize etme amacı göz önüne alındığında matematiksel olarak optimal strateji, bilinen hava yolu şirketi açık bir şekilde daha iyi olmadığı sürece yeni kurulan hava yolu şirketiyle uçmaktır. Eğer bir noktada tanınmış hava yolu şirketinin daha iyi olduğu gerçeği belirgin bir şekilde ortaya çıkarsa -bunun anlamı yeni hava yolu şirketinin Gittins indeks değerinin tanınan hava yolu şirketinin zamanında varış oranının gerisine düşmesi demektir- o zaman katı bir şekilde bilinen hava yoluna geçmeniz ve asla bu kararınızdan dönmemeniz gerekir. (Bu problem kurgusunda yeni havayolu şirketini terk ettikten sonra onlar hakkında daha fazla ilave bilgi edinemeyeceğinizden onların size kendilerini yeniden ispat etme şansları bulunmamaktadır.) Fakat deneyde insanlar tanınmayan hava yolunu iyi olduğunda çok az, kötü olduğunda çok fazla kullanma eğiliminde olmuşlardır. Ayrıca kesin bir şekilde yeni hava yolu şirketini bırakmamışlar ve özellikle her iki hava yolu zamanında varış sergilemediği dönemlerde sıklıkla iki hava yolu arasında gidip gelmişlerdir. Tüm bu veriler, aşırı derecede araştırma yapma eğilimiyle tutarlı hareketlerdir.

Son olarak psikologlar Mark Steyvers, Michael Lee ve E. J. Wagenmakers, bir grup insana 15 şans vererek hangi kolu oynayacaklarını seçmelerini istedikleri bir dört kollu canavar deneyi icra etmişlerdir. Daha sonra katılımcıların benimsemiş olduğu stratejileri sınıflandırmışlardır. Sonuçlara göre bunların yüzde 30’u optimal stratejiye yakinken yüzde 47’si Kazan Kal, Kaybet Değiştir stratejisine yakındı ve yüzde 22’si de yeni bir kol seç-

mekle o ana kadar en iyi sonuç veren kol arasında rastgele seçim yapmışlardı. Yine bu sonuçlar da tıpkı insanların Kazan Kal, Kaybet Değiştir ya da rastgele kolları deneme stratejilerinde olduğu gibi oyunun sonlarına doğru sadece kullanma aşamasına geçmiş olmaları gerekirken hâlen gereğinden fazla bir süre araştırma yaptıkları durumlarda olan sonuçlarla tutarlıdır.

Bu nedenle yeni bir sekreteri çok erken bir aşamada işe alma eğiliminde olduğumuz gibi burada da yeni hava yollarını denemekten çok geç vazgeçme eğiliminde hareket ediyor gibi görünmekteyiz. Fakat tıpkı sekreterinizin olmamasının bir maliyeti olduğu gibi bir hava yolu şirketine çok erken bağlanmanın da bir maliyeti vardır: Dünya değişmektedir.

Standart çok kollu canavar problemi kolların kazandırma oranlarına ait olasılıkların zaman içinde sabit olduğunu varsaymaktadır. Fakat bu durum hava yolu ulaşımı, restoranlar ya da insanların tekrar tekrar tercihte bulunduğu diğer alanlarda geçerli olmak zorunda değildir. Eğer farklı kollara ait getiri olasılıkları zaman içerisinde değişiyorsa -buna “hareketli canavar” denilmektedir- problem çok daha zor bir hâl almaktadır. (Aslında bizi bu problemin tam çözümüne ulaştırabilecek uygulanabilir bir algoritmanın olmaması ve muhtemelen hiçbir zaman olmayacağı nedeniyle zor bir problem hâlini alır.) Bu zorluk derecesinin bir kısmı, artık Önce Araştır Sonra Seç problemi olmamasındandır. Dünyadaki şartlar değiştiğinde, araştırmaya devam etmek doğru seçenek olabilir. Yıllarca adınızı atmadığınız sizi hayal kırıklığına uğratan o restorana, yeni bir işletmeci devralmış olabileceği için yeniden gitmeye degebilir.

Henry David Thoreau “Walking (Yürüyüş)” isimli ünlü yazısında evine yakın çevrelerde nasıl seyahat etmeyi tercih ettiğinden, etrafından nasıl hiç sıkılmadığından ve Massachusetts manzarasında her zaman yeni ya da ilgi çekici şeyleri nasıl buldu-

ğundan bahsetmektedir. “Aslında 16 km yarıçap içerisindeki manzaranın düşündürdükleri ya da öğleden sonra yapılacak bir yürüyüş ile 60 senelik 10 insan hayatı arasında gizlenemeyecek bir uyum vardır. Size asla alışılmış gelmeyecektir.”

Hareketli ve değişen bir dünyada yaşamak, kişinin kendisinde de hareket ve değişim bulundurmasını gerektirir. Bir şeyler değişmeye devam ettiği sürece siz de asla araştırmaktan vazgeçmemelisiniz.

Çok kollu canavar probleminin standart hâli için geliştirilmiş algoritmalar hareketli bir dünyada bile kullanışlıdır. Gittins İndeksi ve Üst Güven Sınırı gibi stratejiler, özellikle getiriler zaman içerisinde çok fazla değişikliğe uğramıyorlarsa oldukça tatmin edici seviyede çözümler sunmaktadır. Ve dünyadaki getiriler bugünlerde geçmişe nazaran tartışmasız bir şekilde daha statik bir durumdadır. Bir kasa yaban mersini bu hafta olgunlaşmışken bir hafta sonra çürümüş olabilir ama Andy Warhol’un da belirttiği gibi “bir kutu kola daima bir kutu koladır.” Sürekli olarak dalgalanma durumunda olan bir dünyadaki evrimlerden etkilenen içgüdülere sahip olmak, endüstriyel standartlaşma çağında çok da kullanışlı bir yaklaşım değildir.

Belki de en önemli husus, optimal çözüme sahip çok kollu canavar problemi türlerini düşünmenin sadece algoritmalar sağlamayacağı, aynı zamanda bakış açısı ve anlayış da sunacağıdır. Problemin klasik versiyonundan türetilen kavramsal kelime dağarcığı -araştırma-kullanma ödünleşimi, zaman aralığının önemi, 0 ve 0 seçeneğinin üst değeri, pişmanlığın minimize edilmesi gibi- sadece önümüze gelen türden problemleri değil, insan yaşamını anlamamızda yeni bir yol sunmaktadır.

Araştır...

Laboratuvar çalışmaları her ne kadar aydınlatıcı olsa da insanların karşılaştığı en önemli problemlerin büyük kısmının gerçekleştiği zaman aralığı laboratuvarda çalışılabilecek uzunluktan çok daha fazladır. Bizi çevreleyen ve sosyal ilişkileri oluşturan dünyanın yapısını öğrenmek, tüm yaşam boyu sürecek bir görevdir. Bu nedenle erkenden araştırmak ve geç kullanmanın bir yaşam boyunca mevcut genel yapısını görmek oldukça faydalı ve eğitici.

Tüm gelişimsel psikologların anlamayı ve açıklayabilmeyi arzuladığı, insanoğlu hakkındaki merak edilen hususlardan biri, yeterli ve kendi başımıza hareket edebilmemizin yıllar sürmesidir. Ren geyikleri ve ceylanlar doğdukları günden itibaren avcılarlarından kaçmak için hazırlıklı olmak zorundadır ama insanlar ilk adımını atmak için bir yıldan fazla bir süre bekler. Berkeley Üniversitesi Gelişim Psikolojisi Bölümü öğretim elemanı ve *The Scientist in the Crib* (Beşikteki Bilim İnsanı) kitabının yazarı Alison Gopnik'in, insanların neden bu kadar uzun bir bağımlılık süresine sahip olduğuna dair bir açıklaması vardır. "Size araştır/kullan dengesini çözmenin gelişimsel bir yolunu sunmaktadır." Daha önceden de gördüğümüz gibi, çok kollu canavar problemlerini çözmeye yönelik iyi algoritmalar önce daha fazla araştırma yapma, sonrasında ise edinilen bilgiyi kullanma eğilimindedir. Ancak Gopnik'in de işaret ettiği gibi, "bunun dezavantajı, araştırma evresindeyken iyi kazanımlar elde etmemenizdir." Bu nedenle çocukluk "size, sadece olasılıkları araştırabileceğiniz ve bunun sonuçları konusunda endişelenmek zorunda olmadığınız çünkü bu sonuçlarla anne ve babaların, büyükannelelerin ve bakıcıların ilgilendiği bir dönem sunar."

Çocukları sadece, hayat boyu sürecek olan bir algoritmanın geçiş aşamasında gibi düşünmek bazı küçük çocukların ebeveyn-

leri için bir teselli kaynağı olabilir. (Tom'un aşırı derecede araştırma ve keşfetme düşkünü okul öncesi çağında olan iki kızı ve onların pişmanlığı minimize eden bir algoritmayı izlediklerine dair umutları vardır.) Fakat bu husus aynı zamanda çocukların akıl yürütme ve mantığı konusunda yeni bakış açıları sağlamaktadır. Gopnik şu noktaya işaret etmektedir: "Eğer insanların çocuklarını yetiştirme şekillerine bakacak olursanız, çocuklar bir şeyleri kullanma yetenekleri konusunda çok kötü oldukları için algısal olarak birçok yönden yetersiz olduklarının büyükler tarafından ileri sürüldüğünü görürsünüz. Ayakkabılarını bağlayamazlar, uzun vadeli planlama yapamazlar, ilgilerini belirli bir noktaya odaklanmış şekilde uzun bir süre tutamazlar. Bunların hepsi, çocukların çok kötü oldukları alanlardır." Ancak rastgele düğmelere basmak, yeni oyuncaklarla çok ilgili olmak ve bir şeyden diğerine süratli bir şekilde geçiş yapmak eylemlerinin tümü de çocukların çok iyi yaptıkları şeylerdir. Ve tüm bunlar, eğer amaçları araştırmak ve keşfetmek ise tam olarak da yapmaları gereken şeylerdir. Eğer bir bebekseniz, evdeki her şeyi ağzınıza götürmek tıpkı bir kumarhanedeki tüm kolları rastgele çekmek gibi bir şeydir.

Daha da genellemek gerekirse, mantıklı olma konusundaki içgüdülerimiz sıklıkla araştırmadan ziyade kullanma eyleminden bilgi alır. Karar verme süreci hakkında konuştuğumuzda, genellikle tek kararın kısa vadedeki getirisine odaklanırsınız ve eğer her verdiğiniz karara sanki son kararınızmış gibi muamele ederseniz, o zaman sadece ve sadece faydalanma önemli olur. Aslında bu kararların çoğu, özellikle de yaşamlarımızın başındakiler için araştırma ve keşfetmeyi -en iyiden ziyade yeni olanı, güvenli olandansa heyecan verici olanı, değerlendirme sonucu elde edildense rastgele olanı- vurgulamak mantıklıdır.

Çocukların kaprisleri gibi algıladığımız davranışları aslında çok daha bilgece bir hareket tarzı olabilir.

...ve Kullan

Yaşamımın okumaya ayırdığım bölümünde, bana benzeyen kişilerin de karşılaşmış olabileceği önemli ve nazik bir durumla karşılaştım. Bu hayatta bana ayrılan sürenin kalan kısmında daha fazla yeni kitap mı okumalıyım yoksa boşa -boşa çünkü sonsuz süre alacak- zaman harcamayı bırakıp bana eskiden okurken büyük zevk veren kitapları yeniden okumaya mı başlamalıyım?

—Lydia DAVIS

Çocuklardan bahsettiğimiz sahnenin diğer ucunda ise yaşlılar yer almaktadır. Ve araştırma/kullanma ödünleşimine yaşlanma bakışıyla baktığımızda, yaşamlarımızın zaman geçtikçe nasıl değişmesi gerektiği konusunda şaşırtıcı anlayışlar görürüz.

Stanford'da psikoloji alanında öğretim elemanı olan Laura Carstensen kariyerini yaşlanma hakkındaki ön yargılarımızla mücadele ederek geçirmiştir. Özellikle insanların sosyal ilişkilerinin yaşlandıkça tam olarak nasıl ve neden değiştiğini araştırmıştır. Temel davranış kalıbı açıktır. İnsanların sosyal ağlarının boyutu (etkileşimde bulundukları sosyal ilişkilerin sayısıdır) zaman içerisinde neredeyse hiçbir değişiklik göstermeden azalmaktadır. Ancak Carstensen'in araştırması bu olgu hakkında nasıl düşünmemiz gerektiğini değiştirmiştir.

Yaşlıların daha küçük sosyal çevreye sahip olmasına dair olan geleneksel açıklama, yaşlanmayla birlikte gelen yaşam kalitesindeki azalmanın -sosyal ilişkilere katkı sağlama yeteneğindeki azalmanın, artan kırılganlığın ve genel manada toplumdan kopmanın sonucu- sadece bir örneğidir. Ancak Carstensen aslın-

da yaşlıların kendi istekleriyle daha az sosyal ilişki içerisinde olduklarını ileri sürmüştür. Ona göre bu azalmalar “tüm yaşam boyu süren ve insanların sosyal ve duygusal kazanımlarını maksimize etmek ve sosyal ve duygusal risklerini minimize etmek için stratejik ve uyarlamalı bir biçimde sosyal çevrelerini geliştirdikleri seçim sürecinin sonuçlarıdır.”

Carstensen ve meslektaşlarının buldukları şey; yaşlanmayla küçülen sosyal çevrelerin nedenin, ilk olarak ilişkilerden nispeten dış çevrede kalanların “budanması” ve bunlar yerine daha az sayıdaki yakın arkadaş ve aile çevresine ilgi gösterilmesi olduğudur. Bu süreç bilinçli bir tercih gibi görünmektedir. İnsanlar yaşamlarının sonlarına doğru yaklaştıkça en anlamlı olduğunu düşündükleri ilişkilerine daha fazla odaklanmak isterler.

Carstensen ve ortağı Barbara Fredrickson, bu hipotezlerini test ettikleri bir deneyde insanlardan 30 dakikalarını kiminle geçireceklerini seçmelerini istediler. Hemen ulaşılabilecek bir aile üyesi, yakın zamanda okumuş oldukları bir kitabın yazarı ya da kendi ilgi alanlarını paylaşan yakınlarda tanışmış oldukları bir kişi gibi. Daha yaşlı kişiler aile üyelerini, gençler ise yazar ya da yeni arkadaşlarıyla buluşmayı tercih ettiler. Ancak deneydeki önemli ve küçük bir değişiklikte gençlere ülkenin diğer ucuna taşınmak üzere oldukları söylendiğinde onlar da aile üyelerini tercih etmişlerdir. Carstensen ve meslektaşları bir diğer çalışmada aynı sonucu tamamen farklı bir bakış açısından yakalamışlardır. Eğer yaşlı kişilere yeni bir tıbbi buluşun yaşamlarına 20 yıl daha ekleyeceği söylenirse bu kişilerin tercihleri de gençlerin tercihlerinden ayrılamayacak kadar benzerlik göstermiştir. Burada belirtilmek istenen nokta, sosyal çevrelerdeki bu farklılıklar düşünüldüğü manada yaşla ilgili değildir. İnsanların kararlarıyla ilgili olarak *zaman aralığının neresinde olduklarını* algılamalarıyla ilgilidir.

Ne kadar zamanınızın kaldığı konusunda duyarlı olmak, tam olarak araştıır/kullan ödünleşimi konusunda bilgisayar biliminin önerdiği şeydir. Gençleri tipik bir şekilde maymun iştahlı, yaşlıları da hareketleri konusunda sabit olarak görürüz. Aslında her iki grup da yaşamlarının zaman aralıkları göz önüne alındığında buna tamamen uygun şekilde hareket etmektedir. Bir sosyal çevreyi en anlamlı ilişkilerden oluşacak şekilde bilinçli bir şekilde daraltmak, bu ilişkilerden keyif almak için kısa bir zamanınız kaldığında verilecek mantıklı bir karşılıktır.

Yaşlılığın kullanma için bir zaman aralığı olduğunun farkına varmak, yaşlanmayla ilgili klasik bazı fenomenler üzerine yeni bakış açıları sunmanıza yardımcı olur. Örneğin, henüz tanışmamış olduğunuz pek çok yeni kişinin yer aldığı yeni sosyal çevre olan bir üniversiteye gitmek olumlu ve heyecan verici bir tecrübeyle, yine henüz hiç tanışmamış olduğunuz kişilerle dolu yeni sosyal çevre olan huzur evine yatırılmak sancılı bir süreç olabilir. Ve aradaki bu fark kısmen yaşamlarımızın bu safhalarında araştıır/kullan sürekliliğinin neresinde olduğumuzun bir sonucudur.

Araştırma/kullanma dengesi bize ayrıca yaşlılardan alacağımız tavsiyeler hakkında nasıl düşünmemiz gerektiğini de söyler. Büyük babanız size hangi restoranın iyi olduğunu söylediğinde onu dinlemelisiniz. Bunlar onlarca yıllık araştırmalar sonucu çıkarılan inciler gibidir. Ancak o her akşam saat 17.00'de aynı restorana gittiğinde siz yeni restoranları (daha kötü olsalar bile) denemek konusunda rahat olmalısınız.

Belki de yaşamın ilerleyen bölümlerini onlarca yıl zarfında edinilen bilgilerden faydalanma şansı olarak görmekten gelen en büyük fayda şudur: Hayat, zaman geçtikçe daha iyi bir hâl almaktadır. Araştırmacı bir kişinin uğruna bilgiden feragat ettiği şey zevktir. Gittins İndeksi ve Üst Güven Sınırı daha önce de gör-

müş olduğumuz gibi, daha az bilinen şeylerin çekiciliğini beklediğimizden fazla olacak şekilde artırır çünkü hoş sürprizler çok daha fazla kazanım sağlayabilirler. Ancak bu aynı zamanda, araştırmanın birçok durumda hayal kırıklığına neden olması anlamına da gelir. Bir kişinin dikkatinin büyük kısmını sevdiği şeylere yöneltmesi hayat kalitesini artırmalıdır. Carstensen yaşlı kişilerin genellikle sosyal çevreleri konusunda daha fazla memnun olduklarını ve genellikle de duygusal anlamda durumlarının genç yetişkinlerden daha iyi olduğunu söylediklerini tespit etmiştir.

Yani o sevilen restoranda akşamüştü geç saatlerde bir kişinin yaşam boyu yaptığı araştırmaların meyvelerinin tadını çıkarma konusunda beklentide olacağı çok şey vardır.

3

Sıralama (Sorting)

Düzenlemek

Bulmayı arzuladığınız kelime eğer (a) ile başlıyorsa bu tablonun başlarına, (v) ile başlıyorsa sonlarına doğru bakınız. Ve eğer kelimeniz (ca) ile başlıyor ise (c) harfinin başlarına, (cu) ile başlıyor ise aynı harfin son bölümlerine doğru bakınız.

—Robert CAWDREY, *A TABLE ALPHABETICALL*
(*ALFABETİK TABLO*), 1604.

Danny Hillis *Thinking Machines* şirketini kurmadan ve meşhur *Connection Machine* süper bilgisayarını icat etmeden önce, öğrenci yurdunda kalırken oda arkadaşının çorapları konusunda sıkıntı yaşayan bir üniversite öğrencisiydi.

Birçok üniversite öğrencisinin aksine Hillis'i dehşete düşüren şey, oda arkadaşının temiz olmaması değildi. Oda arkadaşı çoraplarını yıkamasına yıkıyordu ama sorun bundan sonra başlıyordu.

Oda arkadaşı temiz çamaşırların olduğu sepetten çorabın tekini alıyordu. Daha sonra diğer tekini bulmak için sepetten rastgele çorap çekiyordu. Eğer bu çorap diğerinin eşi değil ise sepete geri koyuyordu. Daha sonra bu işleme devam ediyor,

çorapları tek tek alıyor ve ilkinin eşini bulana kadar geri sepete atıp yenisini alıyordu.

Sadece 10 çift çorabın olduğu sepetten bu metodu izleyerek ilk çifti tamamlamak ortalama olarak 19 kez çorap çekmeyi, ikinci çifti tamamlamak ise ortalama olarak 17 kez çorap çekmeyi gerektirecekti. Toplam olarak oda arkadaşı 20 tek çorabı 10 çift hâline getirmek için 110 defa sepetten çorap çekebilirdi.

Bu durum, bilgisayar mühendisi olmak için okuyan bir öğrencinin odasının değiştirilmesini istemesi için yeterliydi.

Sadece çorapların eşlenmek üzere nasıl ayrılması gerektiği konusu, bilgisayar mühendislerinin şaşırtıcı derecede uzun bir süre konuşmalarını sağlamanın güzel bir yoludur. 2013 senesinde programlama sitesi Stack Overflow’da paylaşılan bir çorap sorusu 12.000 kelimelik bir tartışmaya neden olmuştu.

Efsanevi kriptograf ve Turing ödülü sahibi bilgisayar mühendisi Ron Rivest konuyu açtığımızda bize “Çoraplar benim aklımı karıştırıyor!” diye itirafta bulunmuştu.

Bu yorumu yaptığı sırada da ayaklarında sandalet vardı.

Sıralamanın Büyüsü

Sıralama, bilgisayarların yaptığı en temel eylemdir. Aslında birçok yönden bilgisayarların yaratılma nedenidir.

Amerikan nüfusu 19’uncu yüzyılın sonlarında her on senede yüzde 30 artmaktaydı ve 1870’de nüfus sayımında araştırılan madde sayısı beşken 1880’de 200’e yükselmişti. 1880 sayımındaki bilgilerin bir tabloya dökülmesi sekiz yıl sürmüştü ve 1890 sayımından önce ancak tamamlanabilmişti. O dönem yaşamış olan yazarlardan birinin de belirttiği gibi “kâğıt yığınlarının arasına gömülmüş olan çalışanların kör olmaması ve delirmemesi” bir mucizeydi. Tüm bu iş, kendi ağırlığı altında ezilme tehlikesiyle karşı karşıyaydı. Bir şeyler yapılmak zorundaydı.

Herman Hollerith isimli bir mucit, o dönemki tren biletlerinin delinmesi işleminden esinlenerek bilgi depolamak için delikli manila kâğıtlarından oluşan bir sistem ve bunları sayıp ayıracak Hollerith Makinesi isimli bir makine geliştirdi. Hollerith'e 1889 senesinde makinesinin patenti verildi ve hükümet 1890 nüfus sayımı için bu makineyi kullandı. Kimse daha önce bunun gibi bir şey görmemişti. Şaşkına dönen bir gözlemci şu satırları kaleme almıştı: "Cihaz, Tanrı'nın değirmeni gibi hatasız ama onu çok geride bırakacak kadar hızlı çalışıyor. (ÇN: Bir Alman atasözü der ki 'Tanrı'nın değirmeni yavaş çalışır ama kusursuz öğütür.')" Fakat başka bir gözlemci, cihazın sınırlı bir kullanım alanı olacağı şeklinde bir mantık yürütmüştü. "Bu cihazı devlet kurumlarından başka hiç kimse kullanmayacağı için bu cihazın mucidi muhtemelen hiçbir zaman zengin olamayacaktır." Hollerith'in bir kenara sakladığı bu tahmin tamamen doğru çıkmayacaktı. Hollerith'in şirketi 1911 senesinde *Computing-Tabulating-Recording Company* (Hesaplama-Çizelgeleme-Kayıt Tutma Şirketi) olmak üzere diğer şirketlerle birleşti. Birkaç sene sonra ise ismini IBM (International Business Machines) olacak şekilde değiştirdi.

Bilgileri sıralamak, ertesi yüzyılda da bilgisayarların geliştirilmesi konusunda hâkim bir düşünce oldu. "Hafızaya alınan bir program" için yazılan ilk kod, verimli bir şekilde sıralama işlemi için yazıldı. Aslında ABD hükümetini genel maksatlı bir cihaz için yaptıkları çok büyük finansal yatırımın haklı olduğuna ikna eden şey, bilgisayarın IBM'in kart sıralama makinesini geride bırakan yeteneği olmuştur. 1960'larda yapılan bir çalışma dünyadaki bilgisayar hesaplama kaynaklarının yüzde 25'inden fazlasının sıralama işlemleri için harcadığı tahmininde bulundu. Ve elbette ki sıralama işlemi, neredeyse her türlü bilgiyle çalışan iş kolları için gereklidir. İster en büyüğünü ister en küçüğünü, en

nadir ya da en yaygınını ya da sadece aradığınız şeyi bulmak niyetinde olun, tüm bunlar genellikle sıralama işlemiyle başlar.

Ancak sıralama, bunlardan daha da yaygın bir olgudur. Sonuçta bir şeylerin sınıflandırılmasının ana nedenlerinden biri insanların işine yarayacak bir biçimde gösterilmeleridir ve bunun da anlamı sıralama işleminin aynı zamanda insanların bilgiyle olan tecrübeleri için çok önemli olduğudur. Sınıflandırılmış listeler o kadar yaygındır ki bunların tamamını algılamak için sürekli olarak çaba göstermeliyiz. Ve daha sonra bunları her yerde görmeye başlarız.

E-posta kutumuz genellikle, binlerce e-postalarımızdan ilk 50 tanesini alınma zamanlarına göre sıralanmış biçimde göstermektedir. Yelp sitesinde restoranlara baktığımızda yakınlık ya da beğenilme derecelerine göre sıralanmış olan yüzlercesinin arasında ilk olarak bir düzine kadar bize gösterilir. Bir blog, tarih sırasına göre dizilmiş yazıların listesini gösterir. Facebook haber akışı, Twitter akışı ve Reddit ana sayfaları kendilerini, uygun bir ölçüte göre sıralanmış bir liste şeklinde gösterirler. Google ve Bing tarzı programlara “arama motoru” deriz fakat aslında bu bir yanlış isimlendirmedir. Gerçekte bunlar sıralama motorlarıdır. Google’ı dünyadaki bilgilere ulaşmada bu kadar üstün kılan şey, yazdığımızı yüz milyonlarca web sayfası arasından bulmasından daha çok -1990’lardaki rakipleri genel olarak bu konuda iyi iş çıkarmaktaydılar- bu sayfaları çok iyi bir şekilde sıralaması ve bizlere sadece en alakalı olanları göstermesiydi.

Bilgisayar bilimi tüm bu durumlarda perde arkasında ne olduğunu anlamamız için bizlere bir yol sunmaktadır. Bunun karşılığında da faturalarımız; yazılarımız, kitaplarımız, çoraplarımız ile farkında olduğumuzdan çok daha fazla kez karşılaşp yapamadığımız durumda kaldığımız anlar için bize bazı anlayış fırsatı sunar. Karmaşıklığın kötü yanının (ve erdeminin) büyüklüğünü

belirleyerek bize aynı zamanda hiç sıralama yapmamamız gereken durumları da göstermektedir.

Dahası, aramaya başladığımızda sıralamanın sadece bilgi konusunda yaptığımız bir şey olmadığını farkına varırız. Bu, insanlarla da yaptığımız bir şeydir. Belki de bir sıralama yapmaya dair bilgisayar biliminin başardıkları, en beklenmedik biçimde spor müsabakaları ve boks ringinde faydalı olmaktadır ve bu durum, insanların neden yumrukların uçtuğu bir yerde toplanıp sıralama yaptığını bize açıklamaktadır. Kısacası sıralama, toplumun doğası (bizim yaptığımız diğer büyük ve daha önemli sıralama) hakkında bazı şaşırtıcı ipuçları verir.

Sıralama İzdırabı

1955 senesinde sıralama üzerine yazılan ve yayınlanan ilk bilimsel makalede J. C. Hosken şöyle demişti: “İnsanlar ürün birim maliyetini düşürmek için genellikle üretim hacmini artırmaktadır.” Buna, herhangi bir iktisat öğrencisinin de bilebileceği gibi ölçek ekonomisi denir. Fakat sıralama söz konusu olduğunda hacim felakete davetiye gibidir. Hacim büyüdükçe, diğer durumun aksine “sıralamanın birim maliyeti düşmek yerine artar.” Sıralamanın ölçek ekonomisinin tersi istikametinde bir dikey artışı vardır ve bir şeyleri büyük ölçekler hâlinde yapma konusundaki algılarımızla çelişmektedir. Bir kişilik yerine iki kişilik yemek pişirmek normalde zor değildir ve kesinlikle iki kez birer kişilik yemek pişirmekten daha kolaydır. Ama yüz kitaplık bir rafı düzenlemeniz, her birinde 50 kitap olan iki rafı düzenlemekten daha uzun sürecektir. Çünkü organize edeceğiniz kitap sayısı iki kat fazladır ve her birinin konulabileceği iki kat fazla yer vardır. Ne kadar fazla sayı olursa işler o kadar zorlaşır.

Sıralama teorisinin birinci ve en temel hususu budur. Ölçek, can yakar.

Bu noktadan hareketle, iş sıralaması yaptığımızda çekeceğimiz acı ve ızdırabı minimize etmenin, tamamen düzenlemek zorunda olduğumuz şeylerin sayısını minimize etmekle ilgili olduğu çıkarımında bulunabiliriz. Bu doğrudur. Çorap çiftleme sorunundaki hesaplama zorluğunun üstesinden gelmenin en iyi önlemlerinden bir tanesi daha sık çamaşır yıkamaktır. Üç kat daha sık bir şekilde çamaşır yıkamak sizin çorapları eşlemek için harcayacağınız zamanı dokuz kat azaltabilir. Aslında eğer Hillis'in oda arkadaşı alışık olduğu düzeni sürdürürken sadece çamaşır yıkama sıklığını 14 günden 13 güne bile düşürse, bu ona sepetten 28 kez daha az çorap çekme olarak geri dönerdi. (Ve çamaşır yıkama aralığını bir gün uzatmak ise ona ilave 30 çorap çekme olarak geri dönerdi.)

Böylesine mütevazı ve sadece iki haftalık bir kapsam da bile sıralama işleminin boyutunun kontrol edilemeyecek kadar büyülebildiğini görebiliriz. Ancak bilgisayarlar sürekli olarak tek seferde milyonlarca kalem veriyi sıralamak ve sınıflandırmak zorundadır. Bu nedenle, *Jaws* filminden bir replikte de belirtildiği gibi, daha büyük bir tekneye -ve daha iyi bir algoritmaya- ihtiyacımız olacak.

Ancak sadece nasıl sıralama yapmamız gerektiği ve en iyi metotların hangileri olduğu sorularını bile cevaplamak için ilk olarak başka bir şeyi anlamalıyız: Puanları nasıl sayıp kayıt altına alacağız?

Büyük O: En Kötü Senaryo İçin Bir Standart

Guinness Rekorlar Kitabı, bir deste oyun kâğıdını en hızlı şekilde sıralama rekorunun Çek sihirbaz Zdenek Bradac'a ait olduğunu söylüyor. Bradac 15 Mayıs 2008 tarihinde 52 kâğıtlık bir deste oyun kâğıdını sadece 36,16 saniyede sıralamıştır.* Bunu nasıl yapmıştı? Ona bu başarıyı hangi sıralama tekniği getirmişti? Bu

soru sıralama teorisi üzerine ilgi çekici bir ışık tutabilecek olsa da Bradac yorum yapmaktan kaçındı.

Bradac'ın yetenek ve ustalığına saygı duymamıza rağmen şundan yüzde 100 eminiz: Onun rekorunu biz de kırabiliriz. Hatta *kırılmaz* bir rekor elde edebileceğimizden yüzde 100 eminiz. Tek ihtiyacımız olan, bu konuda yapılacak yaklaşık 80.658.175.170.943.878.571.660.636.856.403.766.975.289.505.440.883.277.824.000.000.000.000 adet deneme. 80 unvigintilliondan biraz fazla olan bu sayı aslında 52 faktöriyeldir ya da matematiksel gösterimiyle “52!”. Bu sayı, 52 kartlık bir destenin sıralanabileceği şekillerin toplam sayısını gösterir. Kabaca bu sayıda kartları kararsak er ya da geç tamamen sıralı bir deste elde ederiz. Bu noktada da 0 dakika 00 saniye ile *Guinness Rekorlar Kitabı*'na Christian-Griffiths isimlerini yazdırabiliriz.

Açıkçası kesinlikle kusursuz olan bu rekor denememiz evren yok oluncaya kadar sürer ve bitmez. Ancak bu durum kayıt tutanlarla bilgisayar mühendisleri arasındaki en temel farkı vurgulamaktadır. Guinness'teki hoş çocuklar sadece *en iyi performanslarla* (ve biralarla) ilgilenirler. Elbette ki bundan dolayı suçlu değiller. Spor müsabakalarındaki tüm rekorlar sadece en iyi performansı simgeler. Lakin bilgisayar bilimi neredeyse hiçbir zaman en iyi performansla ilgilenmez. Bunun yerine bilgisayar mühendisleri Bradac gibi birinin *ortalama* sıralama süresini bilmek ister; bir desteyi sıralamak için 80 unvigintillion deneme süresini ya da daha makul sayıda sıralama deneme süresini hesaba katarak tüm denemelerin sonucunda ortaya çıkan ortalama süreyi hesaplamayı. (Bu tip şeyleri bilgisayar bilimiyle uğraşan kişilere neden yaptırmadıklarını şimdi anladınız.)

Dahası, bir bilgisayar mühendisi *en kötü* sıralama zamanını

* Bu rekor Bradac'ın tek rekoru değildir. Neredeyse aynı sürede su altında üç adet kelepçeden de kurtulabilmektedir.

da bilmek isteyecektir. En kötüyü gösteren durum analizleri bir iş hakkındaki sınırları belirlememize yarar; kritik bir işlemin zamanını, sürecin bitiş zamanını vb. gibi. Bu nedenle kitabın bu kısmında -ve aslında kitabın kalanında- aksi belirtilmediği sürece algoritmaların sadece en kötü senaryo durumlarındaki performanslarından bahsedeceğiz.

Bilgisayar bilimi, özellikle algoritmik en kötü senaryoları ölçmek için bir gösterge geliştirmiştir: “Büyük O” gösterimi. Büyük O gösteriminin kendisine has bir orijinalliği vardır. Tasarım olarak tam belirli değildir. Bu da bir algoritmanın performansını dakika ve saniyeler cinsinden belirtmek yerine Büyük O gösteriminin problemin boyutu ile programın çalışma süresi arasındaki ilişkinin türü hakkında konuşmak için bir yol sunması demektir. Büyük O gösterimi ortaya bilinçli bir şekilde ince detaylar döktüğünden sonuçta ortaya çıkan şey, problemleri farklı sınıflara bölmek için bir şemadır.

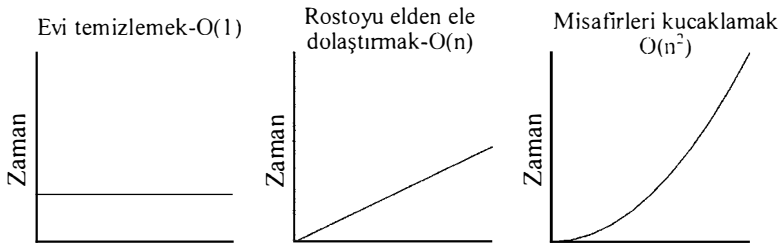
n sayıda misafirin katılacağı bir akşam yemeği verdiğinizi düşünün. Onların gelişinden önce evinizi temizlemek için gerekli olan süre kesinlikle gelecek olan misafirlerinizin sayısına bağlı değildir. Bu durum problem türleri içinde olabilecek en kolay ve sevimli olanıdır. Buna “Büyük O bir” denir ve $O(1)$ şeklinde gösterilir. Buna aynı zamanda “sabit zaman” da denir. Sizin de dikkat edeceğiniz gibi Büyük O gösterimi temizliğin gerçekte ne kadar süreceğiyle hiç ilgilenmez, o süre her zaman aynıdır ve misafir listesi her ne uzunlukta olursa olsun değişmez. Bir, on, yüz ya da başka bir n sayısında misafiriniz olsa da yapılacak iş miktarınız aynıdır.

Piştirdiğiniz rostoyu masada herkesin alabileceği şekilde dağıtmak “Büyük-O n ” olacak ve $O(n)$ şeklinde yazılacaktır. Bu aynı zamanda “lineer (doğrusal) zaman” olarak bilinmektedir. Misafir sayınız iki katına çıktığında yemeğin masanın tamamını

dolaşması için iki kat fazla beklemek zorunda kalırsınız. Burada da Büyük O gösterimi, servis edilen yemek çeşidi ya da bu yemeklerin ikinci defa servis edilmesi gibi durumlarla hiç ilgilenmez. Her durumda zaman, misafir listesinin boyutuna doğrusal bir şekilde bağlıdır. Misafir sayısı ve bunlara servis için gerekli zamanı gösteren bir grafik çizseniz bu dümdüz bir çizgi olur. Dahası, Büyük O gösteriminde herhangi bir doğrusal zaman faktörünün varlığı, diğer tüm sabit zaman faktörlerini yutacaktır. Yani, masada rostoyu bir kez gezdirmek ile yemek odanızı üç ayda yeniden düzenlemek ve *sonra* rostoyu bir kez masada gezdirme arasında bir bilgisayar mühendisi için fark yoktur. Eğer bu size çılgınca geldiyse o zaman bilgisayarların rahatlıkla binler, milyonlar ya da milyarlar olabilecek n değerleriyle ilgilendiğini hatırlayın. Diğer bir deyişle, bilgisayar mühendisleri çok çok büyük paketler hâlinde düşünmektedir. Önem açısından evi yeniden dekore etmek, milyonlarca misafirin olduğu bir davetli listesi ve rostoyu bunlar arasında bir kez dolaştırma karşısında deve-de kulak kalmaktadır.

Peki, misafirler geldikçe her bir misafir yeni geleni kucaklarsa durum ne olur? İlk misafirinizi sizi kucaklıyor, ikincisinin kucaklayacağı iki kişi var, üçüncü misafirinizin ise üç. Toplamda kaç kucaklaşma olacaktır? Bu probleme “Büyük O n kare” denir, $O(n^2)$ şeklinde gösterilir ve “kuadratik zaman” olarak bilinir. Burada da sadece n ve zaman arasındaki temel hatlarla ilgileniriz. Kişi başına iki kucaklama anlamına gelen $O(2n^2)$ ya da kucaklaşma ve yemeği masada dolaştırma olan $O(n^2+n)$ veya sarılma ve ev temizliği anlamına gelen $O(n^2+1)$ diye bir şey yoktur. Sadece kuadratik zaman vardır ve bu nedenle $O(n^2)$ hepsini kapsar.

Buradan itibaren her şey kötüleşir. İlave her misafirin sizin işinizi iki katına çıkardığı “üstel zaman”, $O(2^n)$, vardır. Daha da



$O(1)$ ile gösterilen sabit zaman, $O(n)$ ile gösterilen doğrusal zaman ve $O(n^2)$ ile gösterilen kuadratik zaman

kötüsü, bilgisayar mühendislerinin sadece şakalaşırken hakkında konuştukları gerçekten cehennem gibi problemler olan “faktöriyel zaman”, $O(n!)$, problemleri de -tüm kâğıtlar sıralı hâle gelene kadar karıştırmadan bahsettiğimizdeki gibi- vardır.

Kareler: Kabarcık Sıralama (Bubble Sort) ve Eklemeli Sıralama (Insertion Sort)

Senatör Obama 2007 senesinde Google’ı ziyaret ettiğinde şirketin CEO’su Eric Schmidt soru cevap bölümüne esprili bir şekilde bir iş görüşmesiymiş gibi başladı ve ona “bir milyon otuz iki bitlik bir sayıyı sıralamanın en iyi yolu nedir?” sorusunu yöneltti. Obama hiç vakit kaybetmeden bir gülümsemeyle şu cevabı verdi: “Sanırım **Kabarcık Sıralama** uygulanacak yanlış yöntem olurdu.” Google’daki mühendisler kahkahalara boğuldu. Bunlardan biri daha sonra olanları anlatırken “Kabarcık Sıralama dediğinde beni kazandı” diyecekti.

Obama, bilgisayar mühendisliği öğrencileri için üst sınıfa geçtikçe giderek kum torbasından farksız hâle gelen bir algoritma olan Kabarcık Sıralamanın yanlış olduğunu düşünmekte haklıydı: Basitti, sezgiseldi ve inanılmaz derecede verimsizdi.

Karışık hâle duran kitaplarınızı alfabetik bir şekilde sıralamak istediğinizi düşünün. Bu konuda doğal bir yaklaşım rafınıza

bakıp sıralı olmayan çiftleri -örneğin Wallace'ın ardından Pynchon varsa- aramak ve bunları düzenlemek olurdu. Pynchon'u Wallace'ın önüne koy, daha sonra aramaya devam et, sonuna geldiğinde tekrar rafın başına dön. Sırası yanlış olan bir çift bulamadığınızda işiniz biter.

Yaptığımız bu iş, Kabarcık Sıralamadır ve bu da bizi kuadratik zamana götürür. Sırada olmayan n adet kitap var ve baştan sona yaptığımız her turda en fazla birini düzeltebiliyoruz (küçük bir sorun görüyor, küçük bir sorunu düzeltiyoruz). En kötü ihtimalle raftaki kitaplar tam ters sırada olursa, en az bir kitap n defa hareket ettirilmek zorunda olacaktır. Bu nedenle de n kitap arasında maksimum n defa turlamak bize en kötü senaryo için $O(n^2)$ sonucunu verir.* Yine de bizim tüm kartlar sıralı oluncaya kadar desteyi karıştırma planımızda olduğu gibi $O(n!)$ 'den daha iyidir. Ancak bu karesel ifade hızla çok kötü bir hâl alabilir. Örneğin beş raf kitabı düzenlemek, tek rafı düzenlemenin beş katı değil, 25 katı uzun sürecektir.

Farklı bir yol izleyip tüm kitapları raftan indirerek bunları teker teker yerlerine koyabilirsiniz. İlk kitabı rafın ortasına koyarsınız ve daha sonra ikinciye alıp ilki ile karşılaştırarak onun soluna ya da sağına koyarsınız. Üçüncü kitabı aldığınızda doğru yeri bulana kadar raftaki kitapları soldan sağa doğru incellersiniz. Bu süreci sürdürerek en sonunda kitaplar raftaki doğru yerlerini alır ve siz de işinizi bitirmiş olursunuz.

Bilgisayar mühendisleri bu yaklaşıma (uygun bir şekilde) **Eklemeli Sıralama** demektedir. İyi yönü, bu yöntemin Kabarcık Sıralamadan tartışmasız daha iyi olduğu ve kötü bir ününün olmamasıdır. Kötü yönü ise hızlı olmamasıdır. Burada da her kitap

* Aslında Kabarcık Sıralamanın ortalama süresi, diğerlerine nazaran kısa değildir çünkü kitaplar bulunmaları gereken yerden ortalama olarak $n/2$ konum uzakta olacaktır. Bir bilgisayar mühendisi yine de n kitabın $n/2$ hareketini $O(n^2)$ 'ye yuvarlayacaktır.

için bir ekleme yapmanız gerekmektedir. Ve her ekleme, doğru yeri bulmak için ortalama olarak raftaki kitapların yarısının üzerinden geçmenizi gerektirir. Uygulamada Kabarcık Sıralamadan biraz daha hızlı olsa da benzer şekilde karesel, kuadratik bir zamanda işi bitiririz. Tek raftan fazlasını düzenlemek yine de çok ağır bir iştir.

Kuadratik Engeli Yıkmak: Parçala ve Fethet

Tamamen mantıklı iki yaklaşımın bizi sürdürülemez bir kuadratik zaman sonucuna götürdüğünü gördükten sonra daha hızlı bir sıralama yönteminin mümkün olup olamayacağını merak etmek çok doğaldır.

Sorun, verimlilikle ilgilidir ama bir bilgisayar mühendisiyle konuştuğunuzda sorun daha çok metafizik konulara yakın olur. Konu ışık hızı, zamanda yolculuk, süper iletkenler ya da termodinamik entropi hakkında konuşmaya doğru yön değiştirir. Evrenin temel kuralları ve sınırları nelerdir? Mümkün olan nedir? Neye izin vardır? Bilgisayar mühendisleri bu şekilde kuantum fizikçileri ya da uzay bilimciler gibi Tanrı'nın düzenini araştırırlar. Bu sıralamayı yapmak için gerekli minimum efor nedir?

Herhangi büyüklükteki bir listeyi aynı zaman zarfında düzenleyebilen sabit bir zamanı (misafirler gelmeden evi temizlemek gibi), $O(1)$ bulabilir miyiz? n sayıdaki kitabın bir rafta sıralanmış olduğunu kontrol etmek bile sabit bir zamanda yapılamaz çünkü bütün kitapları kontrol etmek gerekir. Bu nedenle kitapları gerçekten sabit bir zamanda düzenlemek tamamen imkânsız gibi görünmektedir.

Peki ya doğrusal (linear) zaman, $O(n)$, yani bir yemeği masada gezdirme süresi, iki yemek olduğunda meydana gelen durum? Yukarıdaki örnekleri düşündüğümüzde bunun nasıl olabileceğini hayal etmek oldukça zor olmaktadır. Her durumdaki n^2 ifadesi, n

adet kitabı hareket ettirmek zorunda olmanız ve her harekette gerekli iş miktarının da n sayısına bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Sadece n ifadesinin kalabilmesi için n boyutundaki bir büyüklüğün n tane hareketinden nasıl kurtulabiliriz? Kabarcık Sıralamasında $O(n^2)$ çalışma süremiz, n adet kitabın her birini n adet olası yerde hareket ettirmemizden gelmişti. Eklemeli Sıralamada ise kuadratik çalışma zamanı n adet kitabın her birini yerine yerleştirmeden önce n adet kitapla karşılaştırmadan gelmişti. Doğrusal bir zaman içinde sıralama yapmak ise her kitapla, diğer kitap ya da yer sayısından bağımsız olarak sabit bir zaman süresince ilgilenmek anlamına gelmektedir. Pek de olası görünmüyor, değil mi?

O hâlde biliyoruz ki sıralamayı, en azından kuadratik zaman kadar iyi yapabiliriz ama doğrusal zaman kadar iyi bir sürede yapamayacağımız muhtemeldir. Belki de limitimiz doğrusal ve kuadratik zaman arasında bir yerlerdedir. Doğrusal ve kuadratik ya da n ve $n \times n$ arasında olan herhangi bir algoritma mevcut mudur?

Evet. Apaçık bir şekilde gözümüzün önünde durmaktadır.

Daha önce de bahsetmiş olduğumuz gibi, bilgi işleme 19'uncu yüzyılda ABD nüfus sayımlarında, önce Herman Hollerith sonra da IBM tarafından delikli kart sıralama araçlarının geliştirilmesiyle başladı. IBM, 1936 senesinde “collators” denilen ve iki ayrı destedeki kartlarda yer alan bilgileri tek kart yığnında toplayan bir cihaz serisi üretmeye başladı. İki destedeki kartlar kendi içerisinde sıralı olduğu sürece bunları sıralı tek yığın hâline getirmek inanılmaz derecede basitti ve doğrusal bir zaman içerisinde tamamlanıyordu: En üstteki kartları basit bir şekilde karşılaştıır ve hangisi küçük ise onu yaratmakta olduğun yeni desteye koy ve bu işlemi tüm kartlar bitene kadar tekrarla.

John von Neumann'ın saklı yazılım bilgisayarlarının (stored-program computer) gücünü göstermek için 1945'te yazdığı program, kartları birleştirme fikrini aldı ve güzel bir sona taşıdı. İki kartı sıralamak kolaydır: Sadece küçük olanı alın ve üste koyun. Durum iki karttan oluşan bir çift kart destesi (her ikisi de sıralı) olduğunda ise bunları kolaylıkla dört karttan oluşan bir desteye dönüştürebilirsiniz. Bu numarayı birkaç kez tekrarladığınızda ise her biri kendi içerisinde sıralı çok daha büyük desteler elde edersiniz. Çok geçmeden, kendinize kusursuz bir şekilde sıralanmış bir deste hazırlarsınız.

Bu yaklaşım bugünlerde bilgisayar biliminin efsanevi algoritmalarından biri olan **Birleştirmeli Sıralama (Mergesort)** olarak bilinmektedir. 1997 senesinde yazılan bir yazı şöyle demektedir: “Birleştirmeli Sıralama sıralama tarihinde, sıralamanın bilgisayar tarihindeki önemi kadar önemlidir.”

Bu yaklaşımın gücü, doğrusal ve kuadratik zaman aralığında bir karmaşıklıkla sonuçlanmasından gelmektedir. “Yarı doğrusal (linearitmic)” olarak bilinir ve $O(n \log n)$ şeklinde gösterilir. Kartların üzerinden her geçiş, sıralanmış kart destesini iki katına çıkarır. Yani, tüm kartları sırasına koymak için iki rakamını, n sayısına ulaşana kadar kendisiyle çarpmanız gerekir. Diğer bir deyişle 2 tabanında $\log n$. Dört karta kadar olanları iki geçişte, sekiz karta kadar olan kartları üç geçişte ve 16 karta kadar olanı da dört geçişte yapabilirsiniz. Birleştirmeli Sıralamanın parçala ve fethet yaklaşımı, kendisini hızla takip edecek diğer bir yarı doğrusal sıralama algoritmasına da ilham kaynağı oldu. Ve ayrıca yarı doğrusal karmaşıklık derecesinin kuadratik karmaşıklığa oranla bir iyileştirme olduğunu söylemek çok yetersiz kalacak bir ifadedir. Sıralama açısından, örneğin bir nüfus sayımını ele alacak olursak; veri setinizin üzerinden 29 kez geçmeniz ile 300 milyon kez geçmeniz arasındaki farktır. Büyük ölçekli endüstri-

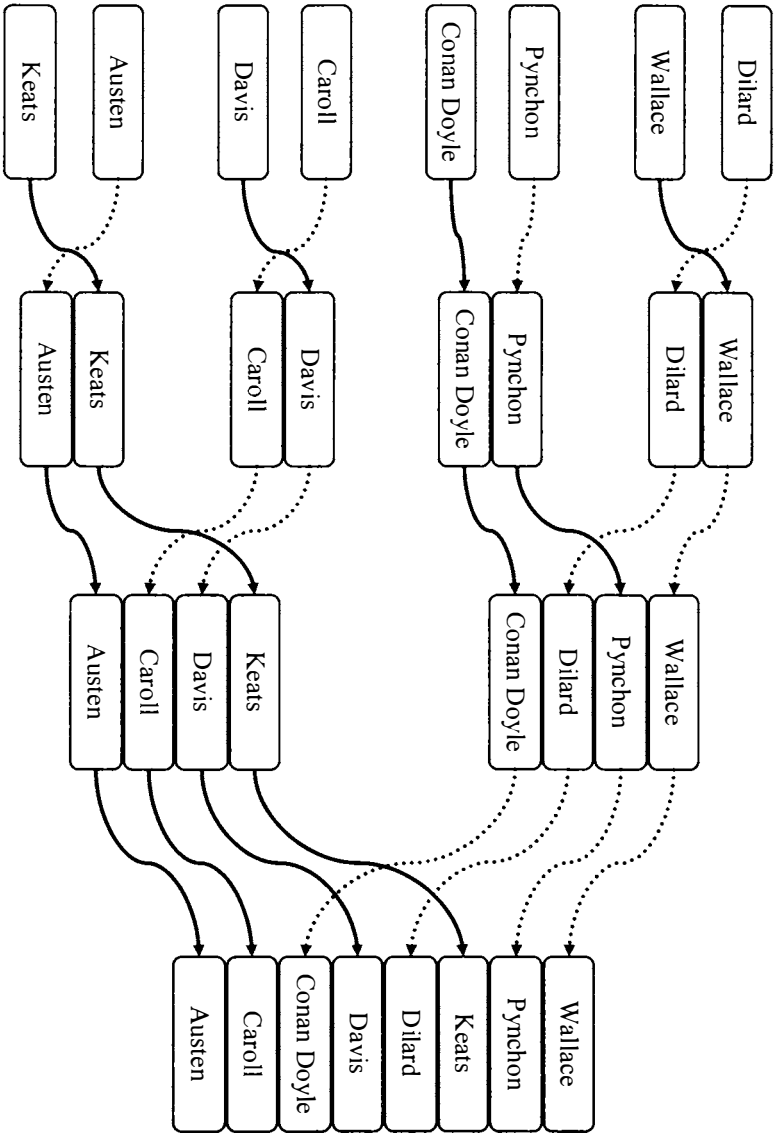
yel sıralama problemleri için seçilen metot olmasına hiç şaşırma-
mak gerekir.

Birleştirmeli Sıralamanın küçük ölçekli evsel problemlerde de gerçek dünyada da uygulamaları bulunmaktadır. Bu kadar yaygın bir şekilde kullanılmasının nedeni, kolaylıkla benzer alanlara uyarlanabilmesidir. Eğer hâlen kitap rafı konusunda strateji geliştiriyorsanız, Birleştirmeli Sıralama çözümü için birkaç arkadaşınızı (tercihen ikinin katları olacak şekilde) çağırın ve önce pizza söyleyin. Sonra kitapları eşit bir şekilde bölün ve herkesin kendi yığınının sıralamasını isteyin. Daha sonra arkadaşlarınızı ikili gruplara ayırın ve destelerini birleştirmelerini isteyin. Sadece iki kitap yığını kalana kadar buna devam edin ve en son turda da bu iki desteyi rafa dizerek birleştirin. Dikkat edin, kitaplara pizza bulaştırmayın.

Eşsiz: Logaritmayı Kurnazca Alt Etmek

Washington'daki Preston şehrinin yakınlarında çok fazla göze çarpmayan bir endüstriyel tesisin girişlerinden birinin ardında 2011 ve 2013 Ulusal Kütüphane sıralama şampiyonu bulunmaktadır. Uzun ve parçalı bir bant, bir barkod okuyucudan dakikada 167 -günde 85.000- kitabı geçirir ve bunları bomba bırakma kapaklarına benzeyen kapaklardan aşağıda yer alan 96 kutudan birine bırakır.

Preston Sıralama Merkezi dünyadaki en büyük ve etkili kitap sıralama tesislerinden biridir. Bu tesiste King County Kütüphane Sistemi kullanılmaktadır ve bu sistem kendisine benzer şekilde teçhiz edilmiş olan New York Halk Kütüphanesi ile rekabet hâlinindedir. Şampiyonluk unvanı dört ardışık sene boyunca iki tesis arasında el değiştirmiştir. New York Halk Kütüphanesi Kitap İşlemleri Bölümü Müdür Yardımcısı Salvatore Magaddino,



Örnek bir Birleştirmeli Sıralama uygulaması. Sekiz sıralanmamış kitabın olduğu bir rafta yan yana olanları çift hâline getirin. Daha sonra çiftlerden sıralanmış dörtlüler oluşturun ve en sonunda da tamamen sıralı rafınızı mutlu günlerde kullanın.

2014 müsabakasından önce “King County bizi mi yenecek? Boş versene” demişti.

Preston Sıralama Merkezi’ne bir teorisyenin açısından bakıldığında etkileyici özel bir durum bulunmaktadır. Sistemden geçen kitaplar $O(n)$ doğrusal zaman içerisinde sıralanmaktadır. Birleştirmeli Sıralama tarafından sağlanan yarı doğrusal zaman, önemli ölçüde ulaşmayı umabileceğimiz en iyi zaman aralığıdır. n sayıda nesneyi bire bir karşılaştırma yöntemiyle sıralamak istiyorsak, bunu $O(n \log n)$ zamandan daha kısa sürede yapmanın başka bir yolu olmadığı ispat edilmiştir. Bu, evrenin temel kurallarından biridir ve etrafından dolaşmanın bir yolu da yoktur.

Ancak bu gerçek, sıralama konusuna son noktayı koymamaktadır. Bunun nedeni bazen tam olarak sıralanmış bir gruba ihtiyacınız olmaması ya da tasnifin bire bir karşılaştırma yapılmadan gerçekleştirilebilmesidir. Bu iki prensip beraber ele alındığında yarı doğrusal zamandan daha kısa sürede pratik sıralama çözümleri sağlamaktadır. Bu husus, kusursuz bir örneği Preston Sıralama Merkezi olan **Kova Sıralaması (Bucket Sort)** ile çok güzel bir şekilde gösterilmektedir.

Kova Sıralamasında nesneler bir grup kategoriye ayrılır ve daha ileri düzey sınıflandırmaya başta ihtiyaç duyulmaz, bu daha sonra yapılabilir. (Bilgisayar biliminde “kova” terimi bir grup sıralanmamış veriye atfedilmiştir fakat Kova Sıralaması yaklaşımının bazı gerçek dünya uygulamaları [King County Kütüphane Sistemi gibi] bu kelimeyi tam anlamıyla kullanmaktadır.) En önemli şey de şudur: Eğer n sayıdaki nesneyi m adet kovaya sıralamak istiyorsanız, bu işlem $O(nm)$ zamanda yapılabilir. Yani, nesne çarpı kova sayısı kadar bir sürede. Ve kova sayısı nesnelerin sayısına oranla nispeten küçük olduğu sürece Büyük O gösterimi bu zamanı $O(n)$ olacak şekilde yuvarlayacaktır. Yani, doğrusal bir zamanda bu işlem gerçekleştirilebilir.

Yarı doğrusal zaman bariyerini gerçekten aşmanın anahtarı, sıralamakta olduğunuz nesnelerin seçildiği dağılımı bilmektir. Kötü bir şekilde seçilen kovalar, sizi ilk başladığınız andan sadece çok az iyileşmeye götürür. Örneğin, eğer tüm kitaplar aynı sepete girecek olursa, hiçbir ilerleme kaydetmemiş olursunuz. Fakat iyi seçilen kovalar nesnelerinizi kabaca eşit sayıda bölecektir ve bu da -sıralamanın “ölçek can yakar” temel prensibine uygun olarak- sıralama yolunda atılmış büyük bir adım olur. Alfabetikten ziyade hedef konu başlıklarına göre kitapların sıralandığı Preston Sıralama Merkezi’nde kovaların seçimi kitapların baskı istatistiklerine bakılarak belirlenir. Bazı konu başlıklarının diğerlerine nazaran daha fazla baskı sayısı mevcuttur, bu nedenle de bunların iki, hatta üç kovaları bulunmaktadır.

Konuyla ilgili insan sıralamacılar hakkında bilgi vermek faydalı olacaktır. Sıralama uzmanlarını iş başında görmek için, rafların toplam uzunluğunun 80 kilometreyi aştığı ve bunların tamamen elle düzenlendiği Berkeley Üniversitesi’nin Doe ve Moffitt Kütüphanelerini ziyaret ettik. Kütüphaneye geri getirilen kitaplar ilk olarak arka tarafta yer alan bir bölüme konulur ve arama numaralarına göre ayrılmış raflara yerleştirilir. Örneğin, bu bölümde bulunan bir raf PS3000-PS9999 arasında arama numarası olan ve henüz teslim edilmiş kitaplar için ayrılmıştır. Daha sonra asistan öğrenciler bu kitapları sıralı olarak 150 kitaba kadar taşıyabilen arabalara yüklemekte ve böylece kütüphane raflarına götürülebilmektedir. Öğrenciler sıralama konusunda temel bir eğitim almakta ve zaman içerisinde kendi stratejilerini geliştirmektedir. Biraz tecrübe kazandıktan sonra 150 kitapla dolu bir arabayı 40 dakikadan daha az bir sürede sıralayabilmektedirler. Bu tecrübenin büyük kısmı neyle karşılaşacağınızı bilmeyi gerektirir.

Kimya bölümü öğrencisi ve yıldız bir sıralamacı olan Berkeley'den Jordan Ho, PS3000-PS9999 numaraları arasındaki kitaplara ait rafta işine devam ederken bizimle konuştu:

Edindiğim tecrübelere göre çok fazla 3500'lü numaralara ait kitap var. Bu nedenle önce 3500'den küçük numaraya sahip kitapları bulmaya ve bunları kabaca sıralamaya çalışıyorum. 3500'den küçük numaralı olanları sıraladıktan sonra 3500-3599 arası serinin büyük bir kesim olduğunu bildiğim için bu bölümü aradan çıkartmak istiyorum. Eğer bu aralıkta ince ayar yapmak istersem, bu aralığı daha da küçük aralıklara bölüyorum. 3510'lar, 3520'ler, 3530'lar gibi.

Jordan 25 kadar kitabı, Eklemeli Sıralama kullanarak sıralamadan önce arabasına koymayı hedeflemektedir. Ve onun dikkatli bir şekilde geliştirdiği stratejisi bunu yapmak için kesinlikle doğru yoldur. Çeşitli kütüphane arama numaralarına ait bilgiye dayalı iyi tahmini ve Kova Sıralaması ona, sepetlerinin neler olması gerektiğini tam olarak söylemektedir.

Sıralama, Arama Hastalığına Karşı Bağışıklık Kazandırır

Tüm bu sıralama algoritmalarını bilmek kitaplarınızı alfabetik bir sıraya koymak isteyeceğiniz zaman işinize yarayabilir. Başkan Obama gibi, Kabarcık Sıralama kullanmamanız gerektiğini bileceksiniz. Bunun yerine insan ve makine kütüphaneciler tarafından tasdik edilmiş iyi bir strateji, Eklemeli stratejinin makul olabileceği yere kadar küçük parçalara bölen Kova Sıralaması ya da Birleştirmeli pizza partisidir.

Ancak eğer bir bilgisayar mühendisinden bu süreci iyileştirmesini talep ederseniz, soracağı ilk soru gerçekten bu sıralamayı yapmanız gerekip gerekmediğidir.

Bilgisayar bilimi, lisans öğrencilerine de öğretildiği gibi bir şey için bir başka şeyden ödün vermayla ilgilenir. Bu durumu arama ve çözümü seçme ya da araştırma ve kullanma arasındaki ödünleşimde de görmüştük. En temel ödünleşim konularından biri *sıralama* ve *araştırma* arasındadır. Burada temel prensip şudur: Bir şeyleri sıralama konusunda harcanan efor, daha sonra bunlar arasında araştırma için harcanacak olan çabaya karşı yapılan önleyici bir taarruz gibidir. Hassas dengenin ne olması gerektiği, durumun tam parametrelerine dayanır ancak sıralamayı *sadece* gelecekteki arama eylemlerini desteklemek için değerli gibi düşünmek bize ilginç bir şey söylemektedir:

En kötü karar, hiç karar vermemekten daha iyidir.

Hiç aramayacağınız bir şey için sıralama yapmak tamamen israftır, hiç sıralamadığınız yığın içinde bir şeyi aramak da etkin değildir.

Buradaki soru elbette ki gelecekteki kullanım durumunuzun ne olacağını önceden nasıl tahmin edeceğinizdir.

Sıralamanın avantajlarını göstermek için yapılacak bir reklam afişinde yer verilecek şey, Google gibi bir internet arama motoru olurdu. Google'ın girdiğiniz ifadeyi alıp yarım saniyeden daha kısa bir sürede tüm internette arayabildiğini düşünmek insanı şok etmektedir. Aslında arama yapamamaktadır ve buna ihtiyacı da yoktur. Eğer Google kullanıyorsanız şunlardan neredeyse emin olursunuz: (a) Veriniz mutlaka araştırılacaktır, (b) Sadece bir kez değil, sürekli olarak araştırılacaktır, (c) Sıralama için gerekli süre araştırma için gerekli süreden “daha az değerlidir.” (Burada, sıralama işlemi makineler tarafından, sonuçlara daha ihtiyaç duyulmadan önce yapılmaktadır ve araştırma, zaman kendileri için önemli olan kullanıcılar tarafından yapılmaktadır.) Tüm bu faktörler, Google ve benzeri arama motorlarının aslında yapmakta olduğu sıralamaya katkı sunmaktadır.

Peki o zaman, kitaplarınızı alfabetik sıraya sokmalı mısınız? Evlerdeki kitaplıklar için sıralamayı değerli kılacak bu durumların neredeyse hiçbiri mevcut değildir. Kendimizi özellikle belirli bir konuda araştırma yaparken bulma ihtimalimiz oldukça azdır. Sıraya sokulmamış kitaplar arasında arama yapmanın maliyeti oldukça düşüktür: Bir kitabın kabaca nerelerde olduğunu biliyorsak, süratle ona erişebiliriz. Ve sıralanmış bir rafta iki saniyede bulmakla, düzensiz bir rafta 10 saniyede bulmak arasındaki fark çok da önemli değildir. Saniyeler kazanmak adına saatler alabilecek sıralama işleminin acil ve önemli olacağı durumlarla nadi-ren karşılaşırız. Dahası, aramaları daha hızlı hareket eden gözlerimizle, sıralama işlemini ise yavaş hareket eden ellerimizle yaparız.

Verilecek karar açıkça ortadadır: Kitaplarınızı rafta sıralamak, kitap aramak için harcayacağınız zaman ve enerjiden çok daha fazlasına mal olacaktır.

Sıralı olmayan kitap rafınız sizi her gün meşgul edecek bir uğraş olmayabilir ama e-posta gelen kutunuz kesinlikle size her gün iş çıkaracaktır ve bu alan, araştırmanın sıralamaya üstün geldiği alanlardan biridir. Elektronik mesajları elle klasörlere yerleştirmek, neredeyse gerçek mektupları tasnif etmek kadar zaman almaktadır. Fakat e-postalar kâğıt versiyonlarına nazaran daha verimli bir şekilde araştırılabilir. Araştırma maliyetleri düş-tükçe sıralama daha değersiz hâle gelmektedir.

Steve Whittaker insanların e-postalarını nasıl düzenlemesi gerektiği konusunda uzmandır. IBM’de araştırma bilimcisi ve Santa Cruz Üniversitesi’nde öğretim elemanı olan Whittaker, yaklaşık 20 yıldır insanların kişisel bilgilerini nasıl yönettiği üzerine çalışmaktadır. (1996 senesinde, birçok kişinin henüz e-postası bile yokken “aşırı e-posta yükü” üzerine bir yazı yazdı.) Whittaker 2011 senesinde e-posta kullanıcılarının sıralama alış-

kanlıkları üzerine bir araştırma yaptı ve bu araştırmanın sonucunda “e-postalarımı düzenleyerek zamanımı boşa mı harcıyorum?” isimli bir makale yazdı. Baştan sürprizi bozalım ve cevabı söyleyelim: EVET. Whittaker bu konuda şuna dikkat çekmektedir: “Gözlemsel ve aynı zamanda deneysel bir durum. Bu tarz düzenleme problemleri hakkında insanlarla görüştüğümde bana hayatlarının bir bölümünü boşa harcadıklarını söylemişlerdi.”

Bilgisayar bilimi düzensizliğin ve sıralamanın tehlikelerinin rakamsal olarak belirlenebilir olduğunu ve bunların maliyetinin aynı birim cinsinden ölçülebildiğini göstermektedir. Bu birim zamandır. Bir şeyi düzensiz bırakmak bir çeşit geciktirme ve ileriye bırakma eylemi olarak görülebilir. Bir kişinin, önceden ödemeyi reddettiği şeyi faiziyle birlikte ileriye bırakması gibi. Ancak bundan daha ince detaylar mevcuttur. Bazen dağınıklık, sadece kolayca kaçmadır. Bazen ise optimal seçenektir.

Sıralama ve Spor Dalları

Araştırma ve sıralama dengesi genellikle bir şeyi dağınık bırakmanın daha verimli seçenek olduğunu öne sürmektedir. Fakat bir şeyleri sıralama ve düzenlememizin tek nedeni zaman kazanmak değildir. Bazen bir düzen oluşturmak kendi başına çözümdür. Ve bu konuya spor sahalarından daha güzel bir örnek bulunamaz.

1883 senesinde Charles Lutwidge Dodgson, çim zeminde oynanan İngiliz tenisi hakkında inanılmaz derecede güçlü fikirler geliştirdi. Bu konudaki görüşlerini şöyle açıklamıştı:

Bir süre önce tesadüfen seyirci olarak bulunduğum bir çim zemin tenis turnuvasında ödül sistemi, turnuvanın başlarında maç kaybeden (ve bu nedenle tüm ödül şansını kaybeden) oyuncuların birinin isyanı nedeniyle dikkatimi çekti. Bu

oyuncu kendisinden daha kötü bir oyuncunun ikincilik ödülünü aldığını görme eziyetine katlanmıştı.

Bu isyan, normal insanlar için bir yenilgi acısı olarak görülebilir ama Dodgson sıradan bir kişi değildi. Oxford’da matematik dersi veriyordu ve sporcunun bu yakınması, onu spor turnuvaları konusunda derin bir araştırmaya sevk etti.

Dodgson sıradan bir Oxford matematikçisi de değildi lakin bu özelliğiyle hatırlanmaz. Bugün daha çok yazar olarak kullandığı ismi olan ve *Alis Harikalar Diyarında* (*Alice’s Adventures in Wonderland*) ile 19’uncu yüzyılın sevilen edebiyat eserlerinin birçoğunu yazarken kullandığı Lewis Carroll olarak tanınmaktadır. Dodgson matematik ve edebiyat yeteneklerini birleştirerek nispeten daha az tanınan eserlerinden birini yaratmıştır: “Çim Tennis Turnuvaları: Mevcut Metodun Kusurlarını İspatlayarak Ödüllerin Tahsisinin Doğru Metodu (Lawn Tennis Tournaments: The True Method of Assigning Prizes with a Proof of the Fallacy of the Present Method).”

Dodgson’ın eleştirisi, oyuncuların tek tek birbirleriyle eşleştirildiği ve bir maç kaybettiklerinde elendiği turnuvanın **Tek Maçlı Eleme** yapısına yönltilmişti. Dodgson’ın da ateşli bir şekilde savunduğu şekilde gerçek en iyi ikinci oyuncu, en son yenilen değil, en iyi oyuncu tarafından yenilmiş olanlardan *herhangi* biri olabilirdi. İronik bir şekilde olimpiyatlarda, tek maçlı eleme usulünün üçüncülük için yeterli olmadığı kabul edilerek bronz madalya maçları yapılmaktadır.* Dodgson “Mevcut metotla birincilik ödülü hariç, ödüllerin tahsisi tamamen anlamsızdır” demişti. Kısacası gümüş madalya bir yalandı.

Dodgson sözlerine şu şekilde devam ediyordu:

* Boksta da olduğu şekilde bazı nadir durumlarda -yeni nakavt olmuş bir boksörün sağlığının tehlikeye girdiği durumlarda- iki bronz madalya verilmektedir.

“Matematiksel bir gerçek olarak ikinci en iyi oyuncunun hak ettiği ödülü alma olasılığı sadece 16/31’dir, bu arda en iyi dört oyuncunun uygun ödülleri alma olasılığı ise 12’de 1 kadar düşüktür!”

Edebi kaleminin gücüne karşın, Dodgson’ın çim tenisi dünyasında çok az etkisi olmuş gibi görünmektedir. Onun önerdiği garip çözüm (sizi daha önce yenmiş birinin yenilmesinin sizi de turnuvadan eleyebilecek olan üçlü eleme sistemi) hiçbir zaman benimsenmedi. Ancak Dodgson’ın çözümü kullanışsız ve hantal olsa da konu hakkındaki eleştirisi bir o kadar yerindeydi. (Yine de gümüş madalyalar hâlen tek maçlı eleme sistemine sahip turnuvalarda dağıtılmaya devam edilmektedir.)

Dodgson’ın mantığında daha derin bir anlam bulunmaktadır. Biz insanlar verilerden ve sahip olduğumuz şeylerden çok daha fazlasını sıralamaktayız. *Kendimizi* de sıralamaktayız.

Dünya kupası, olimpiyatlar, NCAA, NFL, NHL, NBA ve MLB, bunların hepsi sıralama prosedürlerini uygulamaktadır. Sezonları, puan durumları ve bir üst lige yükselme maçları, bir sıralama oluşturmak için algoritmalarlardır.

Spor turnuvalarında en sık karşılaşılan algoritmalarından biri **Yuvarlak Robin (Round Robin)** formatıdır. Burada yer alan n adet takım diğer $n-1$ takımın hepsiyle mücadele eder. Bu sistem tartışmasız bir şekilde en kapsamlı sistem olmasına karşın aynı zamanda en yorucu ve zahmetli sistemlerden biridir. Her takımın diğerleriyle tek tek mücadele etmesini sağlamak akşam yemeği için size gelen konukların hepsinin birbiriyle kucaklaşmasına benzer ve korkulan $O(n^2)$ kuadratik zaman aralığı kadar sürer.

Badminton, Squash ve Raketbol gibi sporlarda yaygın olan **Merdiven (Ladder)** formatındaki turnuvalar, oyuncuları doğrusal bir sıraya dizmekte ve kendilerinden bir üstte yer alan oyuncuya meydan okumalarına ve kazanmaları durumunda yerlerini

değiştirmelerine imkân tanır. Merdiven yapısı spor dünyasının Kabarcık Sıralaması gibidir ve bu sistem de kuadratik yapısıyla istikrarlı bir sıralama yapılması için $O(n^2)$ zaman gerektirir.

Belki de en yaygın olan turnuva formatı, pek çok örneğıyle birlikte Amerikan Kolej Sporları Kurumu Basketbol Ligi (NCCA)’nde (“Mart Çılgınlığı” olarak bilinir) uygulanan grup turnuva (bracket tournament) sistemidir. Mart Çılgınlığı turnuvası “Son 64 turu”, “Son 32 turu”, “Tatlı 16”, “Seçkin 8”, “Dörtlü Final” ve “Final” olarak ilerler. Her tur bir öncekini iki eşit fırsata böler. Bu size logaritmik olarak tanıdık geldi mi? Bu turnuvalar aslında sıralanmamış takım çiftlerinden başlayarak ilerleyen Birleştirmeli Sıralama türündendir. Birleştirmeli Sıralamanın yarı doğrusal zamanda $-O(n \log n)-$ işlediğini biliyoruz ve 64 takım olduğunu düşündüğümüzde sadece altı tur ve 192 maç bekleyebiliriz. Ancak bir Merdiven ya da Yuvarlak Robin olsaydı 63 tur ve 2016 maç olurdu. Bu inanılmaz bir iyileştirmedir: Algoritma tasarımı iş başında!

Mart Çılgınlığı’nın altı turu kulağa hoş gelmekte, değil mi? Ancak bir dakika, 192 maç mı? NCAA turnuvasında sadece 63 maç oynanmaktadır.

Mart Çılgınlığı tam bir Birleştirmeli Sıralama değildir. Çünkü 64 takımın hepsini sıralamaz. Takımları tam olarak sıralamak -ikinciye, üçüncüyü ve devam eden listeyi oluşturmak- için ekstra turlara ihtiyacınız vardır ve bunun sonucu olarak toplamda yarı doğrusal bir rakama ulaşılır. Fakat Mart Çılgınlığı bunu yapmamaktadır. Bunun yerine tıpkı Dodgson’ın yakındığı çim zemin tenis turnuvası gibi elenen takımların sıralanmadan bırakıldığı Tekli Eleme sistemi kullanmaktadır. Bunun sağladığı avantaj, doğrusal zamanda sonuç vermesidir. Her karşılaşma sonucunda bir takım turnuvadan elendiğı için sadece bir takımın sona kalabilmesi için $n-1$ sayıda maça ihtiyacınız vardır. Yani,

doğrusal bir sayı. Bunun dezavantajı ise birincilik haricinde diğer sıralamayı asla bilememenizdir.

Tekli Eleme sisteminde ironik olarak aslında hiçbir turnuva yapısına ihtiyaç duyulmamaktadır. *Herhangi bir şekilde* yapılan 63 maç, ortaya yenilgisiz bir şampiyon çıkaracaktır. Örneğin, “en başarılı takım” şeklinde uygulanan ve bir takımın bir sıra dâhilinde karşısına çıkan takımlarla mücadele edeceği, yenilenin yerini yenenin aldığı ve devam ettiği bir sistem uygulayabilirsiniz. Bu formatın 63 ayrı tura ihtiyacı vardır fakat buradaki dezavantaj, bu maçların eş zamanlı olarak oynanamamasıdır. Ayrıca bir takımın arka arkaya 63 maç oynaması gerekecektir ve bu adil bir durum değildir.

Hiç kimse, Dodgson’dan bir asırdan fazla bir süre sonra dünyaya gelmiş olan Michael Trick kadar Dodgson’ın matematik görüşlerini 21’inci yüzyıl spor dünyasına taşımamıştır. Trick ile optimal duraklama konusunda görüşmüştük. Yüzde 37 Kuralını aşk hayatına şanssız bir şekilde uygulamasının ardından geçen onlarca yılda sadece bir eş ve yöneylem araştırması hocası olmamış, aynı zamanda sezon karşılaşmalarının kurgusunu belirlemek için bilgisayar bilimini kullanarak Beyzbol ligi ve NCAA turnuvalarının baş planlayıcılarından biri olmuştur.

Trick’in de belirttiği gibi, spor ligleri mümkün olan en kısa sürede sezon sonu sıralamalarını belirlemek için aceleci değiller. Sezon takvimleri, heyecanı tüm sezona yayacak ve sürdürecektir şekilde tasarlanmaktadır ve bu durum sıralama teorisinde yaygın değildir.

Örneğin üç alt gruptan oluşan Amerikan Beyzbol Ligi’nde, grupları kimin kazanacağı üzerine mücadeleler görürsünüz. Şimdi, eğer grupları göz ardı edecek olursak bu mücadelelerin bazıları daha sezon başında ara açılarak sonlanmış olur.

Bizim yaptığımız şey, ligin son beş haftası içerisinde grupların diğer gruplarla oynamasını sağlamaktır. Bunun amacı son beş hafta içerisinde kendilerine yakın takımlarla maç yapmalarını sağlamaktır. Bu uygulama fikstüre ya da sezona daha fazla ilgi duyulmasını sağlamaktadır çünkü bu durumda belirsizlik sezon sonuna kadar devam etmektedir.

Dahası, spor müsabakaları elbette ki her zaman müsabaka sayısını minimize edecek şekilde tasarlanmamaktadır. Bunları göz önüne almadığınız zaman spor müsabakalarının fikstürlerinin oluşturulması bir bilgisayar mühendisine gizemli gözükebilirdi. Trick'in 2.430 maçlık normal bir beyzbol sezonu için söylediği gibi "Tam bir sıralama oluşturulması için doğru müsabaka sayısının $n \log n$ olduğunu biliyoruz. Bu sizin herkese ulaşmanızı sağlar. Eğer tek önemli olan en üstteki ise sadece ona ulaşmak için neden n^2 zaman boğuşuyorsunuz?" Diğer bir deyişle, eğer yarı doğrusal zamanda bir sıralama yapabileceğimizi ve n sayısından daha az sayıda müsabakada yenilgisiz bir Tek Elemeli Şampiyon belirleyebileceğimizi biliyorsak, neden $O(n^2)$ ve hatta biraz daha fazla süreli Yuvarlak Robin yapalım ki? Karşılaşmaların sayısını minimize etmek spor liglerinin ilgisini pek çekmemektedir. Bilgisayar biliminde ihtiyaç olmayan karşılaştırmalar yapmak her zaman kötüdür. Zaman ve emek israfıdır. Fakat spor müsabakalarında durum bu değildir. Aslında birçok açıdan, spor müsabakalarının kendisi puan kadar değerlidir.

Üstün Haklar: Gürültü ve Sağlamlık

Spor müsabakalarına algoritma merceğinden bakma çalışmalarının bir başka, belki de daha önemli yolu, gümüş madalyayı verme şeklimizin ne kadar güvenilir olduğundan ziyade altın madal-

yayı vermede ne kadar güvenilir yöntemle sahip olduğumuzu sorgulamaktır.

Michael Trick'in de söylediği gibi, "Bazı sporlarda, örneğin beyzbolda; bir takım oynadığı maçların yüzde 30'unu kaybederken diğer takım da yüzde 30'unu kazanacaktır." Tek Elemeli sistemde bazı rahatsız edici uygulamalar bulunmaktadır. Diyelim ki NCAA'daki maçlar yüzde 70 ihtimalle daha güçlü takımlar tarafından kazanılıyorsa ve turnuvayı kazanmak için art arda altı maç kazanılması gerekiyorsa, o zaman en iyi takımın turnuvayı kazanma ihtimali sadece 0,70'in altıncı kuvveti -yani yüzde 12'den daha az- kadardır! Başka bir şekilde ifade etmek gerekirse, ligin en iyi takımı sadece on yılda bir kez şampiyon olacaktır.

Bazı sporlarda, bir oyunun sonucuna yüzde 70 güvenmek bile en nihai sonuca çok fazla önem vermek anlamına gelebilir. UCSD fizikçisi Tom Murphy çeşitli sayısal modelleme tekniklerini futbola uygulamış ve futboldaki düşük skorların maç sonuçlarının taraftarların hayal edebileceğinden daha fazla rastgele olduğu sonucuna varmıştır. "3-2'lik bir skor, kazanan takımın diğerinden gerçekten iyi olma ihtimalini sadece 8'de 5 olarak vermektedir... Ben şahsen bunu çok etkileyici bulmuyorum. 6-1'lik bir fark bile yüzde yedilik bir hata ihtimali barındırır."

Bilgisayar mühendisleri bu olguya *gürültü (noise)* demektedir. Şu ana kadar incelemiş olduğumuz sıralama algoritmalarının tümü mükemmel, hatasız ve güvenilir karşılaştırmalar yapıldığını; hiçbir zaman iki değerden küçük olanın yanlışlıkla da olsa büyük olarak seçilmeyeceğini varsaymaktadır. "Gürültülü karşılaştırmacıya (comparator)" izin verdiğiniz takdirde bilgisayar biliminin en kutsal algoritmalarının bazıları boşa gitmiş olur ve en kötü üne sahip olan bazıları da en iyi günlerinden birini yaşar.

New Mexico Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarından Dave Ackley bilgisayar bilimiyle

“yapay yaşamın” kesişiminde yaşamaktadır. Bilgisayarların biyoloji biliminden bazı şeyler öğrenebileceğine inanmaktadır. İlk olarak, organizmalar çok az işlemin bilgisayarların güvenilirlik düzeyi seviyesinde olduğu bir dünyada yaşar. Bundan dolayı baştan itibaren araştırmacıların *sağlamlık* (robustness) dedikleri şeye dayanarak gelişirler. Ackley, bu kavramı algoritmalarda da görmemizin zamanının geldiğini ileri sürmektedir.

Sıralama ve araştırma programlama otoriteleri cesur bir dille “Kabarcık Sıralamanın gözle görülür herhangi bir kurtarıcı özelliğinin olmadığını” bildirmesine karşın Ackley ile meslektaşlarının araştırması aslında Kabarcık Sıralama gibi algoritmalara da yer olduğunu ileri sürmektedir. Nesnelerin pozisyonunu bir kez değiştirebilmesinden kaynaklanan verimsizliği, gürültüye karşı bu algoritmayı Birleştirmeli Sıralama gibi hızlı algoritmalara nazaran daha sağlam kılmasının nedenidir. Birleştirmeli Sıralamanın verimliliği ise onu kırılğan kılmaktadır. Birleştirmeli Sıralamanın başlarında yapılan bir hata Tekli Eleme uygulanan bir turnuvanın ilk turundaki şanssız bir mağlubiyete benzer. Bu yenilgi bir takımın tüm şampiyonluk umutlarını bitirmekle kalmaz, aynı zamanda bu takımı sonuç listesinin doğrudan alt yarısına gönderir.* Bir Merdiven turnuvasında ise Kabarcık Sıralamada olduğu gibi, bir yenilgi bir oyuncuyu sıralamada sadece bir sıra aşağıya indirecektir.

Aslında, gürültülü karşılaştırmacı için ortaya çıkan en iyi algoritma Kabarcık Sıralama değildir. Bu bahsi geçen onurun sahibi

* NCAA’ın Mart Çılgınlığı turnuvasının bilinçli bir şekilde bu hatayı azaltacak şekilde tasarlanmış olması ilginçtir. Tekli Eleme sistemindeki en büyük sorun, daha önce de belirttiğimiz gibi kazanan takım tarafından elenen ilk takımın aslında ikinci en iyi takım olduğu ama alttaki yarıda kalarak sıralamaya giremediği senaryodur. NCAA bu sorunun üstesinden gelmek için takımları seri başı olacak şekilde düzenlemektedir. Böylece “dörtlü final” öncesi en üst sıralardaki takımlar ilk turlarda birbirleriyle eşleşmemiş olurlar. Seri başı düzenlemesi daima güvenilirdir. Örneğin, Mart Çılgınlığı tarihinde henüz 16’ncı seri başı olan hiçbir takım 1’inci sıradan seri başı olan bir takımı yenememiştir.

Karşılaştırmalı Sayarak Sıralama (Comparison Counting Sort) isimli bir algoritmadır. Bu algoritmada her nesne, kaç tanesinden daha büyük olduğuna dair puan listesi oluşturularak diğerleriyle karşılaştırılır. Bu rakam daha sonra doğrudan bu nesnenin sıralama derecesi olarak kullanılabilir. Bu algoritma, tüm çiftleri karşılaştırdığı için Kabarcık Sıralama gibi kuadratik zamanlı bir algoritmadır. Bu nedenle geleneksel bilgisayar uygulamalarında popüler bir seçim değildir ancak istisnai derecede aksaklığa dayanıklıdır (fault tolerant).

Bu algoritmanın işleyişi size tanıdık gelebilir. Tıpkı Yuvarlak Robin sistemine sahip bir turnuva gibi işler. Diğer bir deyişle, bir takımın normal sezon fikstürüne benzer. Kendi grubundaki tüm takımlarla oynayıp galibiyet ve mağlubiyet oranlarına göre sıralanırlar.

Karşılaştırmalı Sayarak Sıralama bilinen en sağlam algoritmadır ve kuadratik ya da daha kısa bir sürede spordan hoşlanan kişilerin çok aşına olduğu bir durumu gösterir. Eğer takımınız sezon sonunda dörtlü finale kalamazsa sızlanmayın. Sezon sonrasında (ÇN: ABD Beyzbol Ligi'nde bir sezon üç temel kısma ayrılır; hazırlık dönemi, asıl sezon, sezon sonrası) uygulanan Birleştirmeli Sıralamada şans bir faktördür ama Sayarak Sıralama uygulanan asıl sezonda şansa yer yoktur. Profesyonel lig ile kolej liginin şampiyonlarının karşılaştığı turnuvalar sağlam değildir ama liglerin alt grup sıralamaları oldukça sağlamdır. Farklı bir şekilde ifade etmek gerekirse, eğer takımınız sezon sonrası dörtlü finallerde erkenden elenirse bu kötü şanstır. Lakin eğer takımınız dörtlü finallere kalamazsa, bu acı bir gerçektir. Bu durumda sizi bardaki bir taraftar teselli edebilir. Fakat aynı davranışı bir bilgisayar mühendisinden beklemeyin.

Kan Sıralaması (Blood Sort):

Gagalama Düzeni ve Baskınlık Hiyerarşileri

Şu ana kadar incelediğimiz tüm örneklerde sıralama süreci üstten aşağıya doğruydı: Bir kütüphanecinin rafları sıralaması ya da NCAA'nın takımlara kimlerle ve ne zaman oynayacağını söylemesi gibi. Fakat ya bu karşılaştırmalar sadece gönüllü bir şekilde gerçekleşeydi? Bu sıralama işlemi, aşağıdan yukarıya doğru organik bir şekilde ortaya çıksaydı, ne olurdu?

İnternette oynanan poker oyunu gibi olurdu.

Bir çeşit düzenleme yapısı tarafından idare edilen pek çok spor dalının aksine poker, son on yılda yaşadığı popülerlik patlamasına rağmen normlara uymayan özelliğini hâlen korumaktadır. Üst düzey bazı turnuvalar, katılımcıları açık bir şekilde sıralamasına (ve buna göre ödülleri belirlemesine) rağmen poker oyunlarının önemli bir bölümü hâlen “nakit oyun” olarak bilinir ve iki ya da daha fazla oyuncunun anlık olarak birlikte oynamayı kabul etmesiyle başlamaktadır.

Poker dünyasını, dünyanın en iyi poker oyuncularından biri olan Isaac Hexton'dan daha derinlemesine kimse bilmez. Birçok spor dalında yeterli düzeyde iyi olmak yeterlidir ve bir sporcu yeteneklerinin farkında olmasa da bu onun iyi bir sporcu olduğu gerçeğini değiştirmez. Ancak Hexton pokerle ilgili şunu söylemektedir: “Profesyonel bir poker oyuncusunun en önemli yeteneği ne kadar iyi olduğunu değerlendirebilmesidir. Eğer dünyadaki en iyi poker oyuncusundan biraz kötüsünüz ve sizden iyi olan kişiyle sonsuza kadar oynamaya niyetliyseniz, parasız kalabileceğiniz konusundan emin olabilirsiniz.”

Haxton önde gelen ve sınır tanımayan bir uzmandır. Buradaki “önde gelen” tanımlaması teke tek poker oynayan, “sınır tanımayan” tanımlaması ise en yüksek bahis oranlarıyla oynayan anlamına gelmektedir. Çok elli nakit poker oyunlarında genellikle

profesyonellerle dolu bir masayı besleyen ve kimin kimden daha iyi olduğunu çok önemsemeyen zayıf bir oyuncu -varlıklı bir amatör oyuncu- olacaktır. Önde gelen oyuncuların dünyasında durum farklıdır. “Kimin daha iyi olduğu konusunda sizinle onlar arasında bir anlaşmazlık olmak zorundadır ya da biri isteyerek kaybetmelidir.”

Peki, adil bir fikir birliği olduğunda ve kimse kendisinden daha iyi olan biriyle oynamak istemezse ne olur? Oyunlardaki boş koltukları kapışmaya çalışan oyuncuları görürsünüz. Birçok çevrim içi poker sitesinde sadece sınırlı sayıda oyun masası mevcuttur. Haxton bununla ilgili olarak şöyle demektedir: “Eğer bire bir sınırsız bir şekilde, 50 ya da 100 dolarlık bahislerle oyun oynamak istiyorsanız bunun için sadece 10 masa bulabilirsiniz ve kararlaştırılmış en iyi 10 oyuncu orada oturup karşısına birinin gelmesini bekler. Eğer daha iyi bir oyuncu gelir ve bu masalardan birine oturursa? Ve masada oturmakta olan kişi bahisi artırmak istemezse, hemen masadan kalkar.”

Christof Neuman şöyle demektedir: “İki maymun hayal edin. Biri uysal olarak kendi yerinde oturmakta ve beslenmekteyken, öteki maymun bu maymunun oturduğu yere geliyor. Ve sonra da oturmakta olan kalkıp gidiyor.”

Neumann bir poker metaforu yapmıyor. Kendisi Neuchâtel Üniversitesi’nde maymunlarda baskınlık üzerine çalışan bir davranışsal biyologdur. Onun tarif etmiş olduğu bu duruma *yer değiştirme (displacement)* denir.

Bir hayvan, hiyerarşi konusundaki bilgisini karşılaştığı bir çatışmaya değmeyeceğine karar vermek için kullandığında yer değiştirme meydana gelir. Hayvan topluluklarında kaynaklar ve fırsatlar -yiyecek, eş, tercih edilen yaşam alanları vb.- kıttır ve neyi kimin alacağına bir şekilde karar verilmesi gerekir. Önceden bir sıra belirlemek, bir eş fırsatı ya da bir tutam ot her ortaya

çıkıldığında kapaşmaktan daha az vahşicedir. Her ne kadar hayvanların birbirlerine pençelerini ve dişlerini gösterdiklerinde biraz korksak da biyologlar bu ast-üst ilişkisini (gagalama düzeni) şiddeti önleyen bir davranış gibi düşünmektedirler.

Bu size tanıdık geldi mi? Bu, arama-sıralama ödünleşimidir.

Bu gagalama düzeninin yaratılması, temel olarak *bilişimsel* (*computational*) olan bir problemin yumruk yumruğa çözümünü gibidir. Bu nedenle, çiftliklerdeki tavukların üst gagalarını almak iyi niyetli ancak pek üretken olmayan bir yaklaşımdır. Hiyerarşiyi belirlemek adına bireysel dövüşlerin otoritesini ortadan kaldırır ve sürünün herhangi bir sıralama işlemi yürütmesini oldukça güçleştirir. Bu nedenle sürü içindeki düşmanlık ve rekabet aslında daha da artar.

Hayvan davranışlarına bilgisayar bilimi açısından bakmak çeşitli şeyler kazandırmaktadır. İlk olarak, grup büyüdükçe her birey tarafından karşılaşılabilecek olan düşmanca yüzleşmelerin sayısı önemli ölçüde -en azından logaritmik olarak, hatta belki de kuadratik olarak- artacaktır. Aslında, “kümeslerdeki düşmanca davranışlar” üzerine yapılan çalışmalar “grup sayısı büyüdükçe kümes başına düşen agresif hareketlerin arttığı” sonucuna ulaşmıştır. Sıralama teorisi bu nedenle canlı hayvanları yetiştirme konusundaki etik kuralların sürü ya da topluluk sayısını sınırlamayı içerebileceğini öne sürmektedir. (Vahşi yaşamda, yabani tavuklar 10 ila 20 arasında üyesi olan sürü şeklinde yaşarlar ve bu sayı ticari çiftliklerdeki sayının çok altındadır.) Çalışmalar ayrıca agresifliğin sürüye yeni üye eklenmediği takdirde birkaç hafta sonra ortadan kaybolduğunu, yani grubun kendi hiyerarşisini kurduğunu göstermiştir.

UW-Madison’daki Kompleks ve Kolektif Bilişim Merkezi’nin (Centre for Complexity and Collective Computation) müdür yardımcısı Jessica Flack, doğadaki ademi merkezi sıralama

hakkındaki düşüncelerin en önemli noktası olan üstünlük hiyerarşilerinin aslında *bilgi* hiyerarşileri olduğunu ileri sürmektedir. Flack bu ademi merkezi sıralama sistemlerinde çok önemli bilişim yükü olduğuna işaret etmektedir. Bir maymun sürüsündeki dövüşlerin sayısı, her maymunun hiyerarşi hakkında detaylı ve birbirine yakın bir anlayışa sahip olduğu düşüncesiyle minimumda tutulmaktadır. Aksi takdirde şiddet oldukça yaygın olur ve etrafta kol gezerdi.

Eğer önde gelen oyuncuların mevcut hiyerarşi sırlamasını ne kadar iyi takip ettiklerini düşünecek olursak, hayvanlarda mantık yürütme ve hatırlama yeteneği daha fazla geliştikçe daha az sayıda çatışmayla karşılaşmayı bekleyebiliriz. Ve belki de insanlar optimal olarak en verimli sıralamaya en yakın canlılardır. Haxton poker dünyasıyla ilgili olarak şöyle demektedir: “Ben dünyadaki en iyi teke tek sınırsız oyunculardan biriyim ve kafamda dünyada en iyi olduğunu düşündüğüm yirmi kadar oyuncunun belirli bir sıralaması mevcuttur. Onların da akıllarında benzer bir sıralama olduğunu düşünüyorum. Bu listenin nasıl olduğunda dair oldukça büyük bir uzlaş olduğunu düşünüyorum.” Sadece zihinlerdeki bu sıralama farklılaştığında nakit oyunlar olacaktır.

Bir Dövüş Yerine Bir Yarış

Herhangi bir grubun kendisini sıralama arzusunun iki ayrı olumsuz yanını görmüş olduk. Grup büyüdükçe herkesin yaşamını savaş dolu bir hâle getiren, en az yarı doğrusal bir sayıda yüzleşme mevcuttur ve aynı zamanda her bir kişinin sürekli olarak değişmekte olan durumu takip etmesine ihtiyaç duyarsınız çünkü aksi hâlde kendilerini girmelerine gerek olmayan karşılaşmaların içinde bulacaklardır. Sadece vücudu değil, zihni de yorucu bir durumdur.

Ancak bu şekilde olmak zorunda değildir. Bu maliyetler olmaksızın da sıralama yapmanın yolları vardır.

Örneğin, sadece tek müsabaka süresi içerisinde on binlerce yarışmacının tamamen sıralandığı bir spor müsabakası mevcuttur. (Buna karşın on bin oyuncunun olduğu Yuvarlak Robin uygulanan bir turnuvanın 100 milyon karşılaşmaya ihtiyacı olacaktır.) Burada dikkat edilmesi gereken tek şey bu müsabaka için gerekli sürenin en yavaş katılımcı tarafından belirlenmesidir. Bu spor müsabakası maratondur ve çok önemli bir şeyi açığa çıkarmaktadır: Bir yarış, bir dövüşten temel olarak farklıdır.

Boksörler ile kayakçıların, eskrimciler ile koşucuların arasındaki farklılıkları düşünün. Olimpik bir boksör $O(\log n)$ sefer beyin sarsıntısıyla karşılaşmak durumundadır (kürsüye çıkmak için bu sayı genellikle dört ila altı arasındadır). Burada müsabakalara daha fazla sporcu kabul etmek, hepsinin sağlığını tehlikeye atmak anlamına gelir. Bir kayakla atlamacı ya da kızakla kayma sporcusunun müsabakanın boyutu ne olursa olsun yer çekimiyle sınırlı sayıda birkaç kez kumar oynaması gerekir. Bir eskrimci kendisini $O(\log n)$ kez rakibinin insafına bırakır fakat bir maraton koşucusu sadece bir yarış için dayanıklılığını sürdürmek durumundadır. Performans ölçümünü sadece bir sayıya sabitleyebilmek, sıralamanın belirlenmesi için sabit zamanlı bir algoritmanın ortaya çıkmasıyla sonuçlanır.

Bir şeyin sadece sırasını belirten “sıra (ordinal)” sayılarından doğrudan onun bir niteliğinin ölçümünü belirten “sayma (cardinal)” sayılarına geçiş için yapılan bu hareket ikili karşılaştırmalara gerek olmadan bir kümeyi doğal olarak sıralar. Bu nedenle doğrudan doğruya teke tek karşılaştırmalar gerektirmeyen üstünlük hiyerarşileri oluşturur. Bir çeşit şirketler sıralaması olan *Fortune 500* de bunlardan biridir. Analiz yapanların ABD’deki en değerli şirketi bulmak için Microsoft’u General Motors ile,

daha sonra General Motors'u Chevron ile, Chevron'u Walmart ile vb. detaylı bir şekilde karşılaştırmalarına gerek yoktur. Elma-armut kıyaslaması gibi görünmekte olan bu durum (Kaç yazılım şirketi, kaç petrol şirketine karşılık gelmektedir?) dolar cinsinden bakıldığında elma ile elmanın karşılaştırılmasına dönüşmektedir. Bir kıyaslama aracına -herhangi birine- sahip olmak sorunu halletmektedir.

Örneğin Silikon Vadisi'nde toplantılar hakkında bir özdeyiş vardır: "Siz paraya gidersiniz, para size gelmez." Bayiler kuruculara, kurucular yatırımcılara, onlarda ortaklarına giderler. Bu hiyerarşinin temellerinin bireylerin gücüne gitmesi muhtemeldir fakat bu düzenin kararlarına itiraz etmek pek mümkün değildir. Sonuç olarak sıralama uğruna minimum sayıda yer kapma eylemiyle birlikte bireysel etkileşimler olmaktadır. Genellikle herhangi iki kişi, daha bunu konuşmadan, kimin kime ne kadar saygı göstermesi gerektiğini söyleyebilmektedir. Herkes nerede buluşacağını bilmektedir.

Benzer şekilde denizlerde geçiş hakkı teoride oldukça seçkin anlaşmalarla düzenlenmesine rağmen uygulamada hangi geminin kime yol vereceğine çok basit bir prensip yön vermektedir: "Gros Ton Kanunu." Çok basit ve temel bir anlatımla ifade etmek gerekirse daha küçük olan gemi, büyük olanın yolundan çekilir. Bazı hayvanlar da buna benzer basitlikte bir hiyerarşiye sahip olacak kadar şanslıdır. Neumann'ın gözlemlerinde de yer aldığı gibi, "Örneğin balıklara bakın. Büyük olan baskın olandır. Çok basittir." Ve bu kadar basit olduğu için de oldukça *barışçıldır*. Tavuk ve primatların aksine balıklar bu sıralamayı kan dökmekten yaparlar.

Büyük ölçekli insan topluluklarının var olmasını sağlayan faktörleri düşündüğümüzde kolay yol teknolojilere odaklanmaktır: Tarım, madenler, makineler. Ancak statüyü rakamsal olarak

ölçülebilir şekilde belirtmenin kültürel uygulaması da en az o kadar önemli olabilir. Ve burada para illaki bir kriter olmak zorunda değildir. Örneğin, “büyüklerinize saygı gösterin” gibi bir kural statü sorularına yanıt olabilir. Ve ulusların iç işlerinde de aynı prensip geçerlidir. G-20 gibi diplomatik zirvelerin altında yatan GSYİH gibi bir kıyas yöntemi, ilkel ve kusursuz olmayan bir ölçümdür. Herhangi bir kıyas yönteminin varlığı, ulusal statünün belirlenmesi için bir ulusun en azından yarı doğrusal sayı da olan diğerleriyle karşı karşıya gelme talepleri ile benzerlerini alarak, bunları tüm ulusları sıralayan tek bir referans noktasına taşır. Ulusların karşı karşıya geldiği durumların genellikle silahlı kuvvetleri de içerdiği göz önüne alındığında, bu tek referans sadece zaman değil hayat da kurtarmaktadır.

Yarı doğrusal sayıda olan çatışmalar küçük ölçekli grupların işine yaramaktadır. Doğada da iyi bir şekilde işe yarar. Ancak statünün ikili karşılaştırmalarla -ister görüşme isterse silahlı çatışma içersin- belirlendiği bir dünyada toplumların boyutları büyüdükçe karşı karşıya gelme durumlarının sayısı süratle kontrolden çıkacak şekilde artar. Aynı alanı paylaşan binlerce ya da milyonlarca kişinin olduğu endüstriyel ölçekte işlem yapmak, bir sıçrama adımı daha gerektirmektedir: Sıralama sayılarından büyüklük gösteren sayılara bir sıçrama.

Günlük koşuşturma içinde sızlandığımız şeyler ve bunun bir kavgadan ziyade bir yarış olduğu gerçeği, bizi maymunlardan, tavuklardan ve farelerden ayıran şeydir.

4 Önbellekleme (Caching)

Unut Gitsin

Bilgilerimizin pratik bir şekilde kullanımında unutmanın da hatırlamak gibi önemli bir fonksiyonu mevcuttur.

—William JAMES

Bir sorunuz var. Dolabınızdan dışarı ayakkabılarınız, gömlekleriniz ve iç çamaşırlarınız taşmakta ve yerlere dökülmektedir. “Artık düzenli olmanın zamanı geldi” diye düşünüyorsunuz. O hâlde bir değil, iki sorunuz var.

Bunları tam olarak ifade etmek gerekirse; ilk olarak neyi saklayıp saklamayacağınıza karar vermeniz, ikinci olarak ise bunları nasıl düzenleyeceğinize karar vermeniz gerekmektedir. Neyse ki bir meslek olarak bu ikiz problemlere kafa yoran kişiler vardır ve tavsiyelerini size sunmaktan çok mutlu olurlar.

Martha Stewart neleri saklamanız gerektiği konusunda kendinize birkaç soru sormanız gerektiğini söyler: “Ne kadar zamandır bu kıyafet bende? Hâlâ iş görmekte mi? Hâlihazırda sahip olduğum başka bir kıyafetin benzeri mi? Bunu son kez ne zaman giydim ya da kullandım?” Saklayacaklarınızı nasıl organize edeceğiniz konusunda da “Benzer şeyleri gruplandırın” tavsiyesinde bulunmakta ve onunla aynı alanda uzman olan

kişiler de bu görüşe katılmaktadır. *The Joy of Less* eserinde Francine Jay “Tüm eteklerinizi eteklerle, pantolonlarınızı pantolonlarla, elbiselerinizi elbiselerle ve montlarınızı montlarla gruplandırarak asın” talimatını vermektedir. Kendisini “Amerika’daki en düzenli adam” olarak tanıtan Andrew Mellen da bu konuda “Nesneler türlerine göre tasnif edilmelidir: Tüm gömlekler bir arada, tüm kabanlar bir arada vb. Her tür de kendi içerisinde renk ve stile göre (uzun ya da kısa kollu olması, boğazlı ya da sıfır yaka olması gibi) düzenlenmelidir” demektedir. Bu görüş, çözeceği sıralama probleminin yanı sıra iyi bir tavsiye gibi de görünmektedir. Herkes bu konuda hemfikirdir.

Bunun dışında, saklama alanı konusunda çok fazla kafa yoran daha büyük endüstriler de mevcuttur ve bu iş kollarının kendine has çözümleri vardır.

Dolabınız bir bilgisayarın hafızasıyla hemen hemen aynı sorunu sizin önünüze getirmektedir: Alan sınırlıdır ve amaç hem para hem de zaman tasarrufu sağlamaktır. Bilgisayarların ortaya çıkışından bu yana bilgisayar mühendisleri neyi saklamak ve neyi düzenlemek sorularıyla mücadele etmiştir. Onlarca yıllık bu çabaların sonuçları, Martha Stewart’ın neyin atılacağına dair olan dört cümlelik tavsiyesinde farklı önerilerde bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Hafıza yönetimi alanı aynı zamanda dolabınızın (veya ofisinizin) nasıl düzenlenmesi gerektiğini tam olarak ortaya koymaktadır. Bilgisayarlar ilk bakışta Martha Stewart’ın “benzer şeyleri birlikte gruplamak” tavsiyesini takip etmektedir. İşletim sistemleri bizi dosyalarımızı klasörlere koymaya -benzer olanları birlikte olacak şekilde- teşvik etmekte ve içerikler daha belirgin hâle geldikçe branşlaşan hiyerarşiler oluşturmaktadırlar. Ancak tıpkı bir akademisyenin masasının düzen ve tertibinin onun zihnindeki karmaşıklığı gizlemesi gibi, bir bilgisayarın dosya siste-

minin görünüşteki düzeni verinin aslında altta nasıl saklandığına dair yüksek mühendislik eseri kaosu gizlemektedir.

Gerçekte olan şeye önbelleğe alma (caching) denilmektedir.

Ön belleğe alma, hafıza mimarisinde önemli bir rol oynamaktadır ve işlemci çiplerinin milimetrik olarak yerleşiminden küresel internetin coğrafyasına kadar her şeyin temelini oluşturmaktadır. İnsan yaşamındaki her türlü saklama sistemleri ve hafıza bankaları üzerine yeni bir bakış açısı sunmaktadır. Sadece makinelerimiz için değil, aynı zamanda dolaplarımız, ofislerimiz, kütüphanelerimiz için. Ve de kafalarımız için.

Hafıza Hiyerarşisi

Bu kadının çok keskin bir zekâsı vardı ama çok çok az hafızası vardı... Çalışmaya yetecek kadarını hatırlıyor ve sıkı çalışıyordu.

—Lydia DAVIS

Kabaca 2008 senesinde başlayan yeni bilgisayar pazarındaki herhangi bir kişi, saklama alanına ilişkin tercihini yaparken bir muammayla karşılaşmaktaydı. *Boyut* ve *hızdan* bir miktar vazgeçmek durumundaydı. Bilgisayar endüstrisi şu sıralarda mekanik sabit sürücülerden (hard disk) katı hâl sürücülere (solid state disk, SSD) geçiş yapmaktadır. Aynı fiyat seviyesinde sabit sürücüler çok daha fazla saklama alanı sunmaktadır ama birçok tüketicinin şu anda bildiği gibi ya da çok yakında satın almaya başlayınca öğrenecekleri gibi, bir SSD çok daha iyi performans sergiler.

Sıradan tüketicilerin bilemeyecekleri şey ise bu karşılıklı ödünleşimin makinenin içinde çeşitli ölçeklerde olduğudur ve bu ödünleşim, bilgi işlemin temel prensiplerinden biri olarak görülür.

1946 senesinde Princeton İleri Çalışmalar Enstitüsü'nde (Institute for Advanced Study) çalışmakta olan Arthur Burks, Herman Goldstine ve John von Neumann elektrikli bir “hafıza organı” tasarlamak için teklif sundular. İdeal bir dünyada maddenin ışık hızında sınırsız bir saklama kapasitesi olacağını fakat uygulamada bunun mümkün olmadığını (hâlen de mümkün değil) yazmışlardı. Üç bilim insanı bunun yerine en iyi olduğuna inandıkları şeyi önerdiler: “Her birinin bir öncekine göre daha büyük kapasitesi olan ancak daha yavaş bir şekilde erişilebilen bir hafızalar hiyerarşisi.” Farklı hafıza şekillerinden oluşan bir piramide -küçük ve hızlı hafıza ile büyük ve yavaş hafıza- sahip olarak belki de her iki özellikten de bir şekilde istifade edebilirdi.

Bir hafıza hiyerarşisinin ardındaki temel düşünce, bir kütüphaneyi en az bir kez kullanmış biri için içgüdüsel bir şekilde anlaşılabilir. Örneğin, hazırlayacağınız bir yazı için araştırma yapıyorsanız, çeşitli durumlarda başvurmak için ihtiyaç duyabileceğiniz bazı kitaplar vardır. Her seferinde kütüphaneye gitmektense, elbette ki daha rahat bir şekilde bunlara erişmek adına ilgili kitapları ödünç alır ve evinize götürürsünüz.

Bilgisayar biliminde, “hafıza hiyerarşisi” fikri 1962 senesinde İngiltere, Manchester'da Atlas isimli bir süper bilgisayarın geliştirilmesine kadar sadece bir teori olarak kalmıştır. Ana hafızası, gramofon plağından çok da farklı olmayan, bilgi okuma ve yazmak için eksen etrafında döndürülebilen bir davuldan (drum) oluşmaktaydı. Ancak Atlas'ın kutuplu mıknatıslardan yapılmış, daha küçük ve hızlı “çalışan” bir hafızası vardı. Veri davuldan mıknatıslara doğru okunabilmekte, orada kolaylıkla değiştirilebilmekte ve sonuçlar da tekrar davula yazılabilmekteydi.

Atlas'ın geliştirilmesinden kısa bir süre sonra Cambridge'den matematikçi Maurice Wilkes, daha küçük ve daha hızlı olan bu

hafızanın, veriyi saklamak için iyi bir yer olmadığını fark etti. Daha sonra ihtiyaç duyulabilecek bilgi parçalarını, gelecekte benzer talepler için özellikle hazırda tutmak için kullanılabilirdi ve böylece makinenin işleyiş hızını da kayda değer derecede artırabilirdi. Eğer ihtiyaç duyduğunuz şey hâlen işlemekte olan hafızada ise bunu en baştan davuldan yüklemek zorunda kalmayacaktınız. Wilkes bununla ilgili şunları söylemişti: “Daha küçük olan hafıza, daha ağır işleyen ana hafızadan gelen veriyi kendi üzerinde otomatik olarak biriktirmekteydi ve bunları daha sonraki kullanımlar için, ana hafızayı yeniden işletme zahmetine katlanmaksızın saklamaktaydı.”

Burada önemli olan, aramakta olduğunuzu mümkün olduğu kadar hızlı bulacak şekilde o küçük, hızlı ve kesin hafızayı yönetmek olacaktır. Kütüphane örneğinden devam edecek olursak, eğer ihtiyacınız olan tüm kitapları almak için kütüphaneye sadece bir kez gidebilecekseniz, haftanın geri kalanını evinizde ihtiyacınız olan tüm kitaplar masanızın üzerinde hazır bir şekilde çalışarak geçirebilirsiniz. Kütüphaneye ne kadar fazla sayıda ziyarette bulunursanız işler o kadar yavaş ilerler ve masanız da o kadar az işe yaramış olur.

Wilkes’in teklifi 1960’ın sonlarında IBM 360/85 süper bilgisayarı kullanıldı ve “önbellek” ismini aldı. Önbellekler o zamandan bu yana bilgisayar biliminin her alanında görülmüştür. Sıklıkla başvurmakta olduğunuz bilgi parçalarını el altında hazır bulundurmak o kadar güçlüdür ki bilişim işlemlerinin hepsinde kullanılmaktadır. İşlemcilerin önbellekleri vardır. Sabit disklerin önbellekleri vardır. İşletim sistemlerinin önbellekleri vardır. Web tarayıcılarının önbellekleri vardır. Ve bu tarayıcılara içerik aktaran sunucuların da önbellekleri vardır. Böylece milyonlarca kişinin izlemekte olduğu komik bir kedi videosunu anında sizin

de izlemenizi sağlamaktadır. Lakin kendimizi biraz da aşmaktayız.

Bilgisayarın geçen 50 yılı aşkın süredeki hikâyesi her sene üstel bir şekilde büyümüştür ve bu Intel'den Gordon Moore'un 1975'te yaptığı, bilgisayar işlemcilerindeki transistör sayısının her iki yılda bir ikiye katlanacağına dair ünlü "Moore Yasası" tahminine kısmen uyacak şekilde olmuştur. Aynı oranda gelişmeyen şey ise hafızanın performansdır ve bu da işlem süresine bağlı olarak hafızaya erişmenin maliyetinin aynı zamanda üstel olarak arttığı anlamına gelir. Örneğin yazılarınızı ne kadar hızlı bir şekilde hazırlarsanız, kütüphaneye yapacağınız ziyaretlerin üretkenliğinden olan kayıp o kadar büyük olur. Benzer şekilde her sene üretim hızını ikiye katlayan ancak yurt dışından ithal ettiği parçaların gelişini eski yavaş hızında sürdüren bir fabrikanın, iki kat boşa kalan bir fabrikadan çok da farkı olmayacaktır. Bir süreliğine, Moore Yasası işlemciler dışında verimsiz kaldı. 1990'larda işlemci hızı ve performans arasındaki bu durum "hafıza duvarı" olarak adlandırıldı.

Bilgisayar biliminin bu duvara çarpma karşısındaki en iyi savunması çok daha özenli bir şekilde hazırlanmış bir hiyerarşidir: Önbellek için olan önbellekler için önbellekler şeklinde en aşağıya kadar gitmektedir. Modern tüketici dizüstü bilgisayarları, tabletleri ve akıllı telefonları altı kademeli hafıza hiyerarşisine sahiptir ve hafızayı akıllıca yönetmek bilgisayar bilimi için hiç bugünkü kadar önemli olmamıştır.

O zaman önbellekler hakkında akla gelen ilk soru ile işe başlayalım. Doldukları zaman ne yaparız?

Çıkarma ve Durugörü (Clairvoyance)

Her bilgi eklemesinin, daha önceden bildiğiniz bir şeyi unutmanıza neden olacağı bir anın geleceğinden emin

olabilirsiniz. Bu çok önemlidir, bu nedenle gereksiz gerçeklerin faydalı olanların yerini almadığından emin olun.

—Sherlock HOLMES

Bir önbellek dolduğunda, eğer başka şeyler de saklamak istiyorsanız yer açmanız gerekeceği açıkça ortadadır ve bilgisayar bilminde bu alan yaratma işlemine “önbelleğe yazma ve silme (cache replacement)” ya da “önbellekten çıkarma (cache eviction)” denir. Wilkes konuyla ilgili şunları yazmıştır: “Önbellek ana hafızanın sadece bir parçası olabileceği için veriler orada sonsuza kadar saklanamaz ve üzerlerine yazılmasını sağlayan bir algoritmanın sistemde olması gerekmektedir.” Bu algoritmalar “yazma ve silme denetimleri (replacement policy)” ya da “çıkarma politikaları (eviction policies)” veya sadece önbellek algoritmaları olarak bilinmektedirler.

Daha önceden görmüş olduğumuz gibi IBM önbellek sistemlerinin kullanımında 1960’larda önemli bir rol oynamıştır. Önbellek algoritmaları üzerine yapılan araştırmalarda yeni ufuklar açan çalışmaların evi -çok şaşırtıcı olmayacak bir şekilde- burasıydı ve László “Les” Bélády’nin de evi olması nedeniyle önemlidir. Bélády 1928 senesinde Macaristan’da doğmuş ve 1956 senesinde içinde “diplomaları ve bir takım iç çamaşırından başka bir şey olmayan” sırt çantasıyla Almanya’ya kaçana kadar burada makine mühendisliği üzerine çalışmıştı. Almanya’dan sonra Fransa’ya geçti ve 1961’de ABD’ye yanında eşi, henüz bebek olan oğlu ve cebindeki 1.000 dolarla göç etti. Kendisini IBM’de önbellek temizleme üzerine çalışırken bulduğunda artık neyi yanına alıp neyi geride bırakması gerektiği konusunda yeteri kadar bilgiye sahip olmuştu.

Bélády’nin önbellekleme algoritmaları üzerine 1966 yılında yazdığı makale 15 yıl süresince en fazla atıfta bulunulan bilgisa-

yar bilimi araştırması olacaktı. Bu makalede önbellek yönetiminin amacının, “sayfa ayarları (page defaults)” ya da “önbellek hataları (cache missings)” olarak bilinen, önbellekte aradığınız şeyi bulamadığınız ve bunu bulmak için ana hafızaya gitmek zorunda kaldığınız sefer sayısını minimize etmek olduğu açıklanmaktadır. Bélády yazısında optimal önbellek temizleme işleminin, önbellek dolduğunda ilk olarak *şu andan itibaren en uzak zaman diliminde* ihtiyacımız olacak şeyi hafızadan çıkarmak olduğunu belirtmiştir.

Elbette ki bir şeye tam olarak ne zaman ihtiyacınız olacağını bilmek konusunu söylemek, yapmaktan daha kolaydır.

İleriye bakacak ve optimal politikayı işleme koyacak, teorik olarak her şeyi bilen ve geleceği gören algoritma, bugün kendisine duyulan saygıdan ötürü **Bélády Algoritması (Bélády’s Algorithm)** olarak bilinmektedir. Bélády Algoritması bilgisayar mühendislerinin “durugörü” olarak adlandırdığı algoritmadır: Gelecekteki veriden bilgi alan bir algoritma. Aslında kulağa geldiği kadar çılgınca değildir. Bir sistemin neyi beklemesi gerektiğini bileceği durumlar mevcuttur ama genellikle durugörü (ÇN: Gözle görülmeyen duyu ötesi şeyleri görerek ve duyarak algılama) yapmak zordur ve yazılım mühendisleri Bélády Algoritmasını gerçek yaşamda uygulamaya çalışırken “uygulama zorlukları” ile karşılaştıklarında bunun hakkında şakalar yapmaktadırlar. Buradaki zorluk, şimdiye takılıp kalarak gelecek hakkında sadece tahminde bulunduğumuz her sefer için durugörüye yakın bir algoritma bulmaktır.

Yeni veriyi önbelleğe ekleyip eski verinin üzerine rastgele yazma işleminin yapıldığı **Rastgele Çıkarma (Random Eviction)** uygulayabiliriz. Önbellek teorisinin ilk başlardaki şaşırtıcı sonuçlarından bir tanesi, her ne kadar mükemmellikten uzak olsa da bu yaklaşımın çok iyi olmasıdır. Sonuçlara göre, nasıl işletti-

ğinize bağlı olmaksızın sadece bir önbelleğin var olması bile bir sistemi daha verimli kılmaktadır. Ne de olsa sıklıkla kullandığınız şeyler çok geçmeden yeniden önbellekte yerini alacaktır. Bir diğer basit strateji ise **İlk Giren İlk Çıkar (First-In, First-Out: FIFO)** kuralıdır. Burada en uzun süredir önbellekte yer alan (Martha Stewart'ın “Ne kadardır buna sahibim?” sorusunda olduğu gibi) her ne ise bunu çıkarabilir ya da üzerine yazabilirsiniz. Üçüncü bir yaklaşım ise **Son Zamanda En az Kullanılan (Least Recently Used: LRU)** veri yaklaşımıdır. En uzun süredir dokunulmamış ve kullanılmamış olan veriyi çıkarmak (Stewart'ın “Bunu en son ne zaman giydim ya da kullandım?” sorusu).

Stewart'ın bu soruları sadece birbirinden iki farklı politika önermekle kalmamakta, aynı zamanda önerilerinden biri performans olarak açık bir şekilde diğerini geride bırakmaktadır. Bélády Rastgele Çıkarma, FIFO ve LRU'nun çeşitli türlerini bir dizi senaryo içerisinde karşılaştırmış ve LRU'nun düzenli bir şekilde durugörüye en yakın performansla sahip olduğunu tespit etmiştir. LRU prensibi, bilgisayar mühendislerinin “zamanda yerellik (temporal locality)” olarak adlandırdığı bir nedenden dolayı etkilidir. Eğer bir program bir defa belirli bir bilgi parçasını çağırmış ise yakın gelecekte yine bunu yapması muhtemeldir. Zamanda yerellik kısmen bilgisayarların problem çözme şeklinden (örneğin ilgili şeyleri okuma ve yazma konusundaki bir döngüyü hızla işletmek gibi) kaynaklandığı gibi aynı zamanda insanların problem çözme şeklinden de kaynaklanmaktadır. Eğer bir bilgisayar üzerinde çalışıyorsanız, muhtemelen e-postanızı kontrol edecek, web tarayıcınıza bir şeyler yazacak ve bir kelime işlemcisi programla haşır neşir olursunuz. Bunlardan bir tanesine yakın zamanda erişmiş olduğunuz gerçeği, bunu yeniden yapacağınıza işaret eden bir ipucudur ve diğer her şey

eşit olduğu durumda en uzun süredir kullanmadığınız program muhtemelen bir süre daha kullanılmayacak olandır.

Bu prensip aslında bilgisayarların kullanıcılarına göstermekte olduğu arayüzde de açıkça ortadadır. Bilgisayar ekranlarındaki pencerelerin, “Z sıralaması (Z-Order)” denilen ve hangi programların diğerinin üzerinde gösterileceğine karar veren temsili bir derinlikleri vardır. En uzun zaman önce son kez kullanılmış olan en altta yer alır. Firefox’un eski yaratıcılık bölüm şefi Aza Raskin’in de belirttiği gibi, “Modern bir bilgisayar tarayıcısını kullanırken geçen zamanın çoğu kâğıtları karıştırmanın dijital karşılığı içinde harcanmaktadır.” Bu karıştırma aynı zamanda Windows ve MacArthur işletim sistemlerinde görev değiştirme arayüzlerinde de aynen görüntülenmektedir. Alt+Tab ya da Ctrl+Tab tuşlarına bastığınızda uygulamaları en son kullanılan- dan en uzun zaman önce son kez kullanılmış olana doğru sıralı olacak şekilde görürsünüz.

Çıkarma politikaları üzerine olan literatür bir kişinin hayal edebileceğinden daha derinlere gitmektedir. İçinde frekansı hesaba katan algoritmalar, kullanımın ne kadar yakın zamanda gerçekleştiğini dikkate alanlara, sadece son kullanımı değil bir sonraki son kullanıma kadar geçecek zamanları dikkate alanlara kadar çok çeşitli türleri bulundurmaktadır. Ancak, bazıları uygun şartlarda LRU’dan daha üstün olabilecek yenilikçi önbellek planlarının bol miktarda varlığına karşın LRU’nun kendisi -ve bazı ufak fark içeren türevleri- bilgisayar mühendislerinin favorisidir ve çeşitli boyutlarda çok çeşitli yerleşik uygulamalarda kullanılmaktadır. LRU bize, bir sonrakinde ihtiyaç duyacağımız şeyin en son ihtiyacımız olan olduğunu, bundan sonra ihtiyaç duyacağımızın da muhtemelen en son ikinci kullanılan şey olduğunu söylemektedir. Ve en son ihtiyacımız olacak şey de en uzun zamandır kullanmadığımızdır.

Aksini düşünmek için geçerli ve iyi bir nedenimiz olmadığı sürece, gelecek için elimizdeki en iyi rehber geçmişin bir aynadaki yansımasıdır. Durugörüye en yakın şey, tarihin tekerrür edeceğini varsaymaktır.

Kütüphaneyi Ters Yüz Etmek

California Üniversitesi'nde Gardner tesisinin derinliklerinde, kilitli ve üzerinde "Sadece Yetkili Personel Girebilir" yazan bir kapının ardında üniversite kütüphane sisteminin mücevherlerinden biri yer almaktadır: Cormac McCarthy, Thomas Pynchon, Elizabeth Bishop ve J. D. Salinger; Anaïs Nin, Susan Sontag, Junot Díaz ve Michael Chabon; Annie Proulx, Mark Strand ve Philip K. Dick; William Carlos Williams, Chuck Palahniuk ve Toni Morrison; Denis Johnson, Juliana Spahr, Jorie Graham ve David Sedaris; Sylvia Plath, David Mamet, David Foster Wallace ve Neil Gaiman... Bu kütüphanenin nadir eserler koleksiyonu değildir. Bu onun önbelleğidir.

Daha öncede bahsetmiş olduğumuz gibi, kütüphaneler kendi çalışma masamızla birlikte ele alındığında hafıza hiyerarşisinin doğal bir örneğidir. Kütüphaneler aslında belirli bölümleri ve depolama tesisleriyle birlikte çeşitli seviyelerde hafıza hiyerarşisinin iyi bir örneğidir. Sonuç olarak her türden önbellek sorunlarıyla karşılaşırılar. Kütüphanenin sınırlı teşhir bölümüne hangi kitapların konulacağına, hangilerini elinizdeki yığında bulunduracağınıza ve hangilerinin tesis dışında saklanması gerektiğine karar vermek zorundasınız. Hangilerinin tesis dışına gönderileceği politikası kütüphaneden kütüphaneye değiştirmektedir lakin hemen hemen hepsi LRU'nun bir çeşidini kullanmaktadır. UC Berkeley Üniversitesi'nde süreçleri denetleyen Beth Dupuis "Mesela ana kitap yığında 12 yıldır kullanılmayan bir kitap varsa, bu çıkarılır" demektedir.

12 yıldır el sürülmeyen alanda, yelpazenin diğer ucunda; daha önceki bölümde görmüş olduğumuz “kabaca sıralama” alanı yer almaktadır. Geri iade edildikten sonra kitapların tam olarak tasnif edilerek raflara yerleştirilmeden önce gittiği yer burasıdır. Burada komik olan ise bunları yeniden raflara yerleştiren yardımcıların bir bakıma onları daha düzensiz hâle sokmalarıdır.

Bunun nedeni şudur; eğer zamanda yerellik uygulanırsa, kabaca sıralanan raflar tüm binadaki en önemli kitapları barındıracaktır. Bunlar en son zamanlarda kullanılanlardır, bu nedenle de müdavimlerin en yüksek olasılıkla arayacak olduklarıdır. Kütüphanenin kilometrelerce uzunluğundaki raflarının tartışmasız en ilginç ve aramaya değer rafının hem saklanmış olmasının hem de sadece işlerini yapmakta olan en ciddi kütüphane personeli tarafından sürekli olarak aşındırılması âdeta bir suç gibidir.

Bu sırada, en ünlü ve erişilebilir rafların adresi olan Moffit Undergraduate Kütüphanesi teşhir bölümünde kütüphanenin en yeni edindiği kitaplar sergilenir. Burası FIFO ön belleği örneğidir ve en son okunanları değil, kütüphaneye en son eklenen kitapları önceliklendirmektedir.

LRU algoritmasının bilgisayar mühendislerince yapılan birçok testteki baskın performansı, basit bir öneriyi beraberinde getirmektedir: Kütüphaneyi ters yüz etmek. Yeni edinilenleri arkaya koyun. En son iade edilenleri de teşhire koyun ve burada alınmaya hazır bir şekilde bulunsunlar.

İnsanlar sosyal yaratıklardır ve lisans öğrencileri kendi okuma alışkanlığını incelemeyi ilginç bulacaktır. Böylece kampüs, öğretmenler öğrencilerine “ortak kitaplardan” ödev verdiği zaman kolejlerde çekilen sıkıntının daha organik ve serbest bir şekline dönüşecektir. Öğrencilerin kitap ihtiyacını karşılamak için müşterek entelektüel tesislerin oluşturulması gerekecektir. Bu tesislerde okunan kitaplar, her ne olurlarsa olsunlar, diğer öğren-

cilerin de muhtemelen karşısına çıkacak kitaplar olacaktır. Müşterek kitap programının baştan sona bir benzeri.

Ancak bunun gibi bir sistem, sosyal açıdan sadece daha olumlu olmayacaktır. En son iade edilenler muhtemelen en kısa zamanda yeniden alınacaklar olduğu için aynı zamanda süreç daha da verimli bir hâl alacaktır. Popüler kitapların bazen yığınlar içinde arkada, bazen de teşhirde bulunması durumunda, öğrencilerin kafalarının karışabileceği doğrudur. Ama yeniden raflara gönderilmek için bekleyen yeni iade edilmiş kitaplar her hâlükârda yığınlarda yer almayacaktır. Bu kısa belirsizlik süresince sadece limit dışındadırlar. Yeni iade edilmiş kitapların teşhirde bulunmasını sağlamak öğrencilerin raflardaki işlemleri devre dışı bırakmalarına imkân tanır. Hiçbir çalışan ciltleri yerleştirmek için yığınların içine dalmak zorunda kalmaz ve hiçbir öğrenci bunları yeniden almak için oraya gitmek zorunda kalmaz. Önbelleğin nasıl çalışması gerektiği hususu tam olarak işte budur.

Sokağın Sonundaki Bulut

“Ülkenin bire bir ölçekli gerçek bir haritasını yaptık!”

“Peki, çok kullandınız mı?” diye meraklı bir şekilde sordum.

“Henüz tam olarak açılıp serilmedi. Çiftçiler karşı çıktı. Tüm ülkeyi kaplayacağını ve güneş ışığını keseceğini söylediler. Şimdi biz de harita olarak ülkenin kendisini kullanıyoruz ve o da en az harita kadar işe yarıyor.”

—Lewis CARROLL

İnterneti genelde düz, bağımsız ve gevşek bağlı bir ağ olarak görürüz. Aslında internet, bunlardan hiçbiri değildir. Şimdilerde tüm internet trafiğinin dörtte biri, medyada isminin çıkmamasını

sağlamayı başaran tek şirket tarafından yönetilmektedir. Massachusetts merkezli ve Akamai isimli bu şirket önbellek işindedir.

İnterneti aynı zamanda soyut, maddesel olmayan ve coğrafyadan bağımsız gibi düşünürüz. Verimizin “bulutta” olduğu söylenmektedir ve bunun anlamı uzak ve belirsiz bir yerdir. Bu söylenenler de yine doğru değildir. Gerçek ise internetin fiziksel olarak var olan kabloların ve metal yığınların bir bileşimi olduğudur. Ve tahmin ettiğinizden çok daha fazla coğrafi konuma bağlıdır.

Mühendisler bilgisayar donanımı tasarlarken coğrafyayı çok küçük bir ölçekte göz önüne alırlar. Hızlı hafızalar işlemciye daha yakın şekilde konumlandırılır ve böylece verinin üzerinde seyahat etmesi gereken kablo uzunluğu minimize edilmiş olur. Günümüz işlemci döngüleri Gigahertz’lerle ölçülmektedir ve bu da işlemlerin nanosaniyeler kadar kısa sürelerde gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Bu süre, ışığın sadece birkaç santimetreyi kat etmesi için gerekli olan süreye eşittir. Bu nedenle bir bilgisayarın içindeki bileşenlerin yerleşimi önemlidir. Ve aynı prensibi daha büyük bir ölçeğe uyguladığınızda kabloların santimetre değil, binlerce kilometre uzunlukta olduğu coğrafya internetin işleminde çok önemli bir hâl alır.

Eğer bir web sayfasının ön belleğini, bunu isteyen kişilere coğrafi olarak yakın bir konumda yaratırsanız bu sayfaları o kişilere daha hızlı şekilde sunabilirsiniz. İnternet trafiğinin büyük kısmı şimdilerde, popüler internet sitelerinin kopyalarını barındıran bilgisayarlar olan ve “içerik dağıtım ağları” (content distribution networks, CDNs) denilen bilgisayarlar tarafından idare edilmektedir. Bu uygulama, sayfalara erişmek isteyen kullanıcıların verilerine orijinal sunuculardan bağlanmak için kıtalar arası iletişime geçmek zorunda kalmadan yakınlardaki bir bilgisayardan ulaşmalarına imkân tanır.

Bu CDN'lerden en büyüğü Akamai tarafından idare edilmektedir. İçerik sağlayıcılar, daha iyi performansa sahip olmak için internet sitelerinin "Akamaileşmesi" için para öderler. Örneğin BBC'den bir video izleyen Avustralyalı muhtemelen Sydney'deki yerel bir sunucuyu kullanmaktadır. Bu kişinin talebi hiçbir zaman Londra'ya gitmemektedir. Bunu yapmak zorunda da değildir. Akamai'nin baş mimarı Stephen Ludin "Mesafenin önemli olduğuna inanmaktayız ve bu düşünce aynı zamanda şirketin etrafına kurulu olduğu düşünceyi temsil etmektedir" demektedir.

Daha önce de bahsetmiş olduğumuz gibi, bazı bilgisayar hafıza türlerinin daha hızlı performansları vardır ancak birim saklama alanı başına daha fazla maliyete sahiptirler. Bu durum her ikisinden de mümkün olan en fazla şekilde faydalanmaya çalışan bir "hafıza hiyerarşisine" neden olmaktadır. Ancak önbellek mimarisinin akla yatkın olması için farklı malzemelerden yapılmış olan hafızalara sahip olmak aslında gerekli değildir. Önbellek işlemi performanstan ziyade yakınlık daha kıt kaynak olduğu zaman faydalıdır.

Bu temel bakış açısı (talep edilmekte olan dosyaların kullanılacakları yere yakın bir yerde saklanması gerekliliği) aynı zamanda saf bir şekilde çevre anlamına gelmektedir. Örneğin Amazon'un devasa sipariş işleme merkezleri (fulfillment center) genellikle her türden insan yapımı düzenlemeden uzak durur; bir kütüphanede ya da depoda görebileceğiniz türden. Çalışanlara, gelen nesneleri depoda bulabildikleri herhangi bir yere koymaları söylenmiştir. Piller kalemıraşlarla, bebek bezleri, barbekü ızgaraları ve DVD'lerle yan yana olacak şekilde yerleştirilir ve barkodlar kullanarak her malzemenin yerini merkezi bir veri tabanına kaydetmektedirler. Ancak bilinçli olarak geliştirilen bu düzenli değilmiş gibi görünen depolama sisteminin de gözle görülür bir istisnası mevcuttur. Çok fazla talep gören şeyler diğer-

lerinden daha hızlı bir şekilde erişilebilecek ayrı bir alanda depolanmaktadır. Bu alan Amazon'un önbelleğidir.

Amazon yakın zamanlarda bu prensibi bir adım daha ileriye taşıyacak bir yenilik için patent aldı. Patent, daha siz bir şeyi satın almadan önce Amazon'un bir şekilde size bunu gönderebilmesi olarak algılanan "siparişsiz paket gönderimi (anticipatory package shipping)" hakkındadır. Amazon da diğer tüm teknoloji şirketleri gibi bu çeşit bir Bélády-vari yeteneğe sahip olmayı isterdi fakat bu yeni uygulama, buna yakın bir şey olan önbelleklemeyle ilgilidir. Aslında belirli bir bölgede popüler olan ürünleri o bölgede yer alan bir alt kademe deposuna göndermektedirler. Yani, satın alınan nesnelerin bir CDN'ine sahiptirler. Daha sonra bir müşteri sipariş işlemini tamamladığında bu kişinin siparişi aslında hemen sokağın öbür ucundaki depoda hazır olacaktır. Bireylerin satın alacakları şeyleri önceden bilmek oldukça zordur lakin iş, birkaç bin kişinin alacaklarını tahmin etmek olduğunda büyük rakamlar kuralı işin içine girmektedir. Diyelim ki Berkeley'deki bir kişi geri dönüşüm yapılmış kâğıtlardan üretilmiş bir tuvalet kâğıdı sipariş edecektir ve siparişini yaptığı anda ürün neredeyse adresine ulaşmış olacaktır. Bir bölgede popüler olan şeyler aynı zamanda fiziken de o bölgede olduğunda bulut teknolojisinin daha enteresan bir şekli ortaya çıkmaktadır. 2011 senesinde web tasarımcısı Micah Mertes, Netflix'ten alınan verilerle -her eyalette alışılmadık şekilde favori olan filmleri belirterek- ABD'nin bir haritasını yarattı. Sonuç olarak büyük çoğunlukla insanların yaşadıkları yerlerde geçen filmleri seyretmekten hoşlandıkları ortaya çıktı. Washington'da yaşayanlar Seattle'da geçen *Bekarlar'ı* (*Singles*), Louisianalılar ise New Orleans'ta geçen *The Big Easy*'i, Los Angeles'ta yaşayanlar tabi ki *L. A. Öyküsü*'nü (*L.A. Story*); Alaska'dakiler *Braving Alaska*'yı, Montanalılar da *Gizemli Miras*'ı (Montana Sky) izlemekten hoşlan-

maktaydılar.* Ve HD filmleri hafızada depolamak oldukça önemli olduğu için Netflix'te dosyaları buna göre düzenlemiştir.

İnsanların Günlük Yaşamlarında Önbellekleme

Önbellekleme, bilgisayarların içindeki dijital bilgileri düzenlemek olarak başlamış olsa da, insanların çevrelerinde yer alan fiziksel nesneleri düzenleme alanında uygulanabileceği açık bir şekilde ortadadır. Stanford Üniversitesi dekanı ve modern önbellek sistemlerinin geliştirilmesine öncülük etmiş John Hennessy ile konuştuğumuzda şu bağlantıyı hemen görmüştü:

Önbelleklemeyi her zaman yapmakta olduğumuz için çok bariz bir işlemdir. Yani, elde ettiğim bilgi miktarıyla birlikte şu anda takip etmek zorunda olduğum belli şeyler vardır; masamdaki şeyler ve sahada olan şeyler. Ve daha sonra, en nihayetinde ihtiyacım olduğunda üniversite arşivlerinden çıkarmanın tam bir gün aldığı şeyler. Ancak biz bu tekniği, yaşamlarımızı düzenlemek için aslında her zaman kullanmaktayız.

Bu sorunlar arasındaki doğrudan benzerlik, bilgisayar biliminden elde edilen çözümleri evlerimizde de bilinçli bir şekilde uygulamanın bir potansiyele sahip olduğu anlamına gelir.

İlk olarak neyi saklayıp neyi atacağınıza karar verirken LRU muhtemelen kullanılacak iyi bir prensiptir; FIFO'dan çok daha iyi bir yaklaşımdır. Üniversiteye gittiğiniz dönemden kalan tişörtü sık olarak giymekteyseniz bunu atmanın bir anlamı yoktur. Ancak çok uzun zamandır giymediğiniz kareli pantolon ne olacak? Bu pantolon ikinci el mağazasında başkalarının çok hoşuna gidebilir.

* *Benim Güzel Idaho'm (My Own Private Idaho)*, sebebi anlaşılamayan bir şekilde en çok Maine'de sevilmekteydi.

İkinci olarak coğrafî konumdan istifade edin. Nesnelerin, kullanıldıkları alana en yakın önbellek benzeri alanlarda bulunduğundan emin olun. Bu tavsiye, evlerdeki kitapları düzenleme açısından çok kesin bir kural olmamakla birlikte birçok kişi için işe yarar olarak görülmektedir. Örneğin Julie Morgenstern, *Organizing from the Inside Out* adlı eserinde şöyle demektedir: “Koşu ve spor malzemelerimi dış kapının yanındaki dolaba yakın bir yerde sepette bulunduruyorum. Bunların evin kapısına yakın olması hoşuma gidiyor.”

Biraz daha uç bir örnek ise William Jones’un *Keeping Found Things Found* isimli kitabında şu şekilde karşımıza çıkmaktadır:

Bir doktor bana evinin düzeniyle ilgili yaptıklarını anlattı. “Pek anlamlı değil ama ben eşyalarımı, nerede ihtiyacım olacağını düşünüyorsam oraya koyuyorum. Çocuklarım benim deli olduğumu düşünüyor.” Bu sistemine bir örnek olarak bana, yedek elektrikli süpürge torbalarını oturma odasındaki koltuğun arkasına koyduğunu söyledi. Oturma odasındaki koltuğun arkasına mı? Bu sizce mantıklı mı?... Ama sonuçta elektrikli süpürgeyi genellikle oturma odasındaki halı için kullanmaktaydı. Elektrikli süpürge torbası dolduğunda ve yenisi lazım olduğunda bu durum genellikle oturma odasında yaşanmaktaydı. Ve burası da yedek torbaların tam olarak bulunduğu yeri.

Son olarak, dolapların düzenlenmesi konusundaki yayınlarda henüz yerini almamış olan bir yaklaşım ise çok seviyeli hafıza hiyerarşisidir. Bir önbelleğe sahip olmak verimlidir ama birden çok -en küçük ve hızlıdan en büyük ve yavaş a kadar değişen özelliklerde- ön belleğe sahip olmak, daha iyi olabilir. Evinizdeki eşyalarınız açısından ele alınırsa, elbise dolabınız birinci sevi-

ye önbellekken bodrumunuz ikinci seviye ve kiralık deponuz ise üçüncü seviye önbellektir. (Bu seviyeler elbette ki erişilme hızına göre sıralanmaktadır ve bir malzemenin herhangi bir seviyeden alınarak diğerine taşınmasında LRU prensibini göz önüne almalısınız.) Bir başka önbellek düzeyi daha ilave ederek işleri daha da hızlandırabilirsiniz. Elbise dolabınızın yakınlarına çok daha küçük, hızlı erişilebilen yeni bir dolap alabilirsiniz.

Tom'un aksine aşırı derecede hoşgörü sahibi eşi, Tom'un bu konunun ne kadar verimli bir yaklaşım olduğu konusundaki ısrarlarına rağmen yatağın hemen kenarında yer alan elbise yığınına karşı çıkmaktadır. Şansa bakın ki bilgisayar mühendisleriyle yaptığımız sohbetler sonunda bu soruna da bir çözüm bulundu. San Diego Üniversitesi'nden arama motorları üzerine çalışan Rik Belew, dilsiz uşak kullanmayı önerdi. Bugünlerde çok fazla görmemenize rağmen dilsiz uşak ceket, pantolon ve kravatın birlikte asılabildiği bir eşyadır; evdeki önbellek ihtiyaçlarınıza cevap verebilecek kusursuz bir askı. Bu yaklaşım bilgisayar mühendislerinin sadece sizin için zaman kazandırmayacağını, aynı zamanda evliliğinizi de kurtarabileceğini göstermektedir.

Dosyalama ve Yığınlama

Neyi saklayacağınıza ve bunu nereye koyacağınıza karar verdikten sonra önünüzdeki en son zorluk ise bunu nasıl düzenleyeceğinizi bilmektir. Dolaba nelerin konulacağından ve dolabın nerede olması gerektiğinden bahsettik fakat içerideki elbise ve eşyalar nasıl düzenlenecek?

Buraya kadar görmüş olduğumuz tüm ev düzenleme tavsiyelerinin içindeki sabit olan şeylerden bir tanesi “benzer şeyleri gruplamadır” ve belki de bu yaklaşımın en çok ters düştüğü tavsiye de Yukio Noguchi'den gelmektedir. “Vurgulamam gerekir ki benim yöntemimdeki temel prensip dosyaları içeriklerine göre

gruplamak değildir.” Noguchi, Tokyo Üniversitesi’nde bir ekonomisttir ve ofisinizle yaşamınızı düzenlemek için “süper” numaralar öneren bir dizi kitabın yazarıdır. Kitapların isimlerini kabaca çevirecek olursak: *Süper İkna Metodu*, *Süper İş Metodu*, *Süper Ders Çalışma Metodu* ve bizimle en çok ilgili olan da *Süper Düzenleme Metodu*.

Noguchi bir ekonomist olarak kariyerinin başlarında kendisini sürekli olarak bilgiye boğulmuş bir şekilde bulmaktaydı: Yazışmalar, müsveddeler, istatistikler gibi. Ve günün büyük bir kısmını bunları düzenlemek için harcamaktaydı. Bu nedenle bir alternatif aradı. İşe her bir belgeyi, belgenin başlığı ve tarihiyle etiketlenmiş bir dosyaya koyarak ve tüm dosyaları büyük bir kutuya koyarak başladı. Her belgeyi doğru yere koyma konusunda hassas davranmamıştı ve sonuçta bir düzen sağlayamamıştı. Daha sonra 1990’ların başlarında çığır açıcı bir yeniliğe imza attı. Dosyaları özellikle kutunun sol tarafına yerleştirmeye başladı ve böylece “süper” dosyalama sistemi doğmuş oldu.

Noguchi sol kenardan ekleme kuralını yeni dosyaların yanı sıra eskiler için de izlenmesi gereken bir kural olarak belirtmektedir. İçeriğini kullanmak üzere dosya aldığınız her seferinde, işiniz bittiğinde bunu en sol kenara koyarak kutuya yeniden bırakmalısınız. Ve bir dosya aradığınızda her zaman aramanıza en soldan başlamalısınız. En son kullanılan dosyalar bu nedenle en hızlı şekilde erişilebilecek olanlar olacaktır.

Noguchi bu uygulamanın, her dosyayı sol tarafa geri koymanın tam olarak eski yerine koymaktan daha kolay olması nedeniyle başladığını söylemektedir. Daha sonra yavaş yavaş bu prosedürün sadece basit değil, aynı zamanda şaşırtıcı derecede verimli olduğunun farkına varmıştı.

Noguchi dosyalama sistemi, kullandığınız bir şeyi geri bırakan açık bir şekilde zaman kazandırmaktadır. Ancak yine de

bunun ihtiyacınız olan dosyaları bulma konusunda iyi bir yol olup olmadığı sorusu mevcuttur. Sonuç olarak bu yaklaşım, benzer şeylerin birlikte bulunması gerektiğini söyleyen diğer verimlilik gruplarının tavsiyelerinin tam tersi şekilde işlemektedir. Aslında düzenli kelimesinin İngilizce karşılığı olan “organized” kelimesi de organlardan oluşan bir vücudu çağrıştırmaktadır ve organlar da benzer yapı ve işleve sahip hücrelerin bir araya gelmiş hâlleridir.

Ancak bilgisayar bilimi bize birçok üstadın vermediği bir şeyi vermektedir: Garanti.

Noguchi bilmiyordu ama yarattığı dosyalama sistemi LRU prensibinin bir uzantısını temsil etmektedir. LRU bize önbelleğe yeni bir şey eklediğimiz her seferinde, burada yer alan en eski şeyi çıkarmamızı söylemektedir fakat bize yeni geleni nereye koyacağımızı söylememektedir. Bu sorunun cevabı 1970 ve 1980’lerde sürdürülen bir dizi araştırmanın sonuçlarından gelmektedir. Bu çalışmalardaki problem türünün ismi “kendi kendini düzenleyen listeler” idi ve kurgusu neredeyse tam olarak Noguchi’nin dosyalama ikileminin bire bir aynısıydı. Sıralı bir şekilde bulunan bir dizi nesneniz olduğunu ve belirli nesneleri bulmak için periyodik olarak bunların üzerinden geçmek zorunda olduğunuzu hayal edin. Aramanın kendisi doğrusal olmak zorundadır ama aradığınız şeyi bulduğunuzda bunu sıradaki herhangi bir yere geri koyabilirsiniz. Aramayı mümkün olduğu kadar verimli kılmak için bu alınan nesneleri nereye koymalısınız?

Kendi kendini düzenleyen listeler Daniel Sleator ve Robert Tarjan tarafından 1985’te yayımlanan açıklayıcı bir çalışmayla (klasik bilgisayar bilimi kafasıyla yazılmıştır) her türlü talep sırası göz önüne alınarak listeyi organize etmenin çeşitli yöntemlerinin en kötü senaryolardaki performansları incelenmiştir. Çalışma doğal olarak ön taraftan başladığı için, talep edilip aranması

en muhtemel nesneleri önde olacak şekilde düzenleme yaparsınız. Ancak bunlar hangi nesneler olacaktır? Burada da yine durugörü güçlerimiz olmasını istedik. Zamanını Princeton ile Sili-kon Vadisi arasında geçiren Tarjan bununla ilgili olarak “Eğer sırayı önceden biliyor olsaydınız veri yapısını tüm sıra için gerekli zamanı minimize edecek şekilde ayarlayabilirdiniz. Bu en iyi çevrim dışı algoritmadır. Eğer isterseniz buna Tanrı’nın Algoritması ya da gökyüzündeki algoritma diyebilirsiniz” demektedir. Sleator ile Tarjan’ın sonuçları bazı “çok basit ve kendisini ayarlayabilen planların şaşırtıcı bir şekilde sabit bir durugörü faktörü içerdiğini” göstermektedir. Eğer LRU prensibini (aldığınız bir nesneyi sıranın en başına geri koyarak) takip ederseniz arama için harcadığınız toplam zaman hiçbir zaman gelecekte neyin talep edileceğini bildiğiniz durumdakinin iki katından daha fazla olmayacaktır. Bu, diğer hiçbir algoritmanın sağlayamayacağı türden bir garantidir.

Noguchi Dosyalama Sistemini LRU prensibinin uygulamadaki bir örneği olarak görmek, bunun sadece verimli olmadığını söylemektedir. Aslında optimal bir algoritmadır.

Sleator ile Tarjan’ın sonuçları aynı zamanda bize bir yeni özellik daha sunmaktadır, hem de Noguchi Dosyalama Sistemi- ne yan tarafından bir bakış atarak. Basitçe belirtmek gerekirse yan tarafının üzerine devrilmiş bir kutu dosya bir yığın oluşturmaktadır. Ve yığınları yukarıdan başlayarak aşağıya doğru aramak bunların doğası gereğidir ve ne zaman aradan bir dosya çekseniz bu dosya bulunduğu yere değil en üste geri konulmaktadır.*

* Bilgisayarınızın da dosyalarınızı bir yığın şeklinde göstermesi için onu zorlayabilirsiniz. Bilgisayarların varsayılan dosya arama arayüzleri sizin alfabetik bir şekilde klasörlere tıklamanızı sağlar, ancak LRU’nun gücü sizin bunu aşabileceğinizi söylemektedir ve dosyaları “isimleri” yerine “en son açılma” zamanlarına göre sıralayabilirsiniz. Aradığınız şey neredeyse her zaman en üste yakın bir yerde olacaktır.

Kısacası, kendi kendilerini düzenleyen listelerin matematiği radikal şekilde farklı bir şey önermektedir. Masanızdaki büyük evrak yığını, kendinize karşı suçluluk duymanızı tetikleyen bir kaos sorunu olmaktan ziyade aslında mevcut olan en verimli ve en iyi şekilde tasarlanmış yapılardan bir tanesidir. Diğerlerinin gözünde düzensiz bir dağınıklık gibi görünen şey aslında kendi kendisini düzenleyen bir yığındır. Aldığınız evrakları yığının en üstüne geri koymak, geleceği bilmeden yapabileceğiniz en iyi şeydir. Kitabın bir önceki bölümünde, bir şeyleri düzenlemeden bırakmanın her şeyi düzenlemek için zaman harcamaktan daha verimli olduğu durumları incelemiştik ama burada bunları düzenlememeniz için bir başka neden mevcuttur.

Zaten bunları düzenlemiştinizdir.

Unutma Eğrisi

Elbette ki hafızalar hakkındaki hiçbir tartışma, “hafıza organı” olan insan beyninden bahsetmeden tam sayılamaz. Son yıllarda bilgisayar biliminin etkileri, psikologların hafıza hakkındaki düşüncelerinde devrime neden olmuştur.

İnsan hafızası bilimi hakkındaki çalışmaların 1879’da Berlin Üniversitesi’ndeki Hermann Ebbinghaus isimli genç bir psikologla başladığı söylenmektedir. Ebbinghaus insan hafızasının nasıl çalıştığının derinliklerine inmek ve zihnin, diğer tüm bilim dalları gibi matematiksel şekilde çalışılabileceğini göstermek istemişti. Böylece, kendi üzerinde deneyler yapmaya başladı.

Ebbinghaus her gün oturup anlamsız hecelerden oluşan bir liste ezberlemekteydi. Daha sonra kendisini önceki günlerin listelerinden teste tabi tutmaktaydı. Bu düzeni bir yıl boyunca sürdürdükten sonra insan hafızası araştırmalarındaki pek çok temel sonucu ortaya koymuş oldu. Örneğin, bir listeyi birden çok defa tekrar etmenin bu listeyi uzun dönemli hafızada muhafaza etme-

yi sağladığını ve bir kişinin hatırlayabildiği nesnelerin sayısının zaman içerisinde giderek azaldığını kanıtladı. Onun sonuçları hafızanın zaman içerisinde nasıl zayıfladığını ve şimdilerde psikologların “Unutma Eğrisi” olarak adlandırdıkları şeyi ortaya koydu.

Ebbinghaus’un sonuçları insan hafızası hakkındaki nicel bir araştırmanın güvenilirliğini ortaya koymuştu ancak bir şeyi, gizemli kalacak şekilde ortaya çıkarmıştı. Neden özellikle bu eğri? Bu, insan hafızasının iyi olduğuna mı yoksa kötü olduğuna mı bir işaretti? Burada altta yatan hikâye ne idi? Bu sorular 100 yıldan uzun bir süredir psikologların araştırmalarına neden olmaktadır.

Carnegie Mellon’da psikolog ve bilgisayar mühendisi olan John Anderson, 1987’de kendisini üniversite kütüphanelerinin bilgi alma sistemleri hakkında okurken bulmuştu. Anderson’un hedefi (ya da en azından o öyle olduğunu sanıyordu) bu sistemlerin tasarımlarının insan hafızasından yararlanılarak nasıl olabileceği hakkında bir şeyler yazmaktı. Ancak bunun yerine tam tersi gerçekleşti. Bilişim biliminin zihin hakkındaki çalışmaların eksik parçasını kendisine sunabileceğinin farkına vardı.

Anderson bununla ilgili, “Uzunca bir süre, kendiminki de dâhil olmak üzere insan hafızası hakkındaki mevcut teorilerde bir şeylerin eksik olduğunu hissetmiştim. Temel olarak, bu teorilerin tamamı hafızayı keyfi ve optimal olmayan bir konfigürasyon olarak tanımlamaktadır... Ben ise temel hafıza süreçlerinin oldukça uyarlanabilir ve belki de optimal olduğunu düşünmüştüm fakat bunu anlatacak şekilde bir yapıyı hiç gözümde canlandıramamıştım. Bilgisayar biliminde bilgi çağırma konusundaki bu yapıyı tam da gözlerimin önünde görmüş oldum” demiştir.

Unutma hakkında doğal ve kolay bir düşünce şekli, zihinlerimizin sadece yeterli saklama alanlarının dolması olarak tanımla-

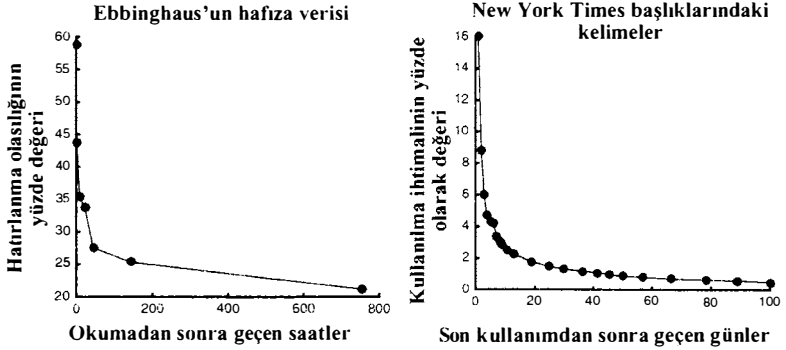
nabilir. Anderson'un insan hafızası konusundaki yeni düşünce şeklinin ardındaki en önemli fikir, sorunun saklama alanı ile ilgili değil de düzenlemeyle ilgili olduğudur. Onun teorisine göre zihnin hatıralar için sınırsız bir alanı mevcuttur lakin bizim onları aramak için sınırlı zamanımız mevcuttur. Anderson burada Kongre Kütüphanesi'ndeki tek ve uzun bir rafa Noguchi Dosyalama Sistemi uygulanması benzetmesini yapmaktadır. Bu rafa istediğiniz kadar kitap sığdırabilirsiniz fakat bir şey ön tarafa ne kadar yakın ise o kadar kolay bulunacaktır.

İyi bir insan hafızası için önemli olan şey, bir bilgisayar için iyi bir önbellek ne yapıyorsa odur: Gelecekte hangi nesnelerin isteneceğini tahmin etmek.

Durugörü hariç, insanların dünyasında böyle tahminleri yapmanın en iyi yolu, dünyayı anlamaktır. Anderson, ortağı Lael Schooler ile birlikte Ebbinghaus'unkilere benzer çalışmaları insan zihinleri üzerine değil de insan toplumu üzerine yapmak için yola koyuldu. Buradaki soru çok açıktı. Dünyanın kendisinin "unutması" konusunu tanımlayan kalıplar (olayların zaman içerisinde unutulma şekilleri) nelerdi? Anderson ve Schooler üç ayrı insan çevresini analiz etti: New York Times başlıkları, ebeveynlerin çocuklarıyla olan konuşmalarının kayıtları ve Anderson'un kendi e-posta gelen kutusu. Tüm alanlarda bir kelime, kullanıldıktan hemen sonra yine kullanılmaktaydı ve bununla yeniden karşılaşma olasılığı da zaman geçtikçe azalmaktaydı.

Diğer bir deyişle gerçek yaşamın da Ebbinghaus eğrisini taklit ettiğini gösteren istatistiksel bir yapı mevcuttu.

Bu durum dikkate değer bir konuya işaret etmektedir. Eğer bir şeylerin zihnimizde unutulma şekli, nesnelerin etrafımızda kullanılmasının azalıp yok olmasıyla aynı şekil ise o zaman Ebbinghaus'un unutma eğrisinin çok iyi bir açıklaması mevcut olabilir. Tam olarak ifade etmek gerekirse, ihtiyaç duyulması büyük



İnsan zihni ve insanın bulunduğu çevreler. Soldaki şekil, Ebbinghaus'un bir listeden doğru bir şekilde hatırladığı hecelerin sayısını listeyi ezberledikten sonra beklediği saat sayısının bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Sağdaki şekil ise belirli bir günde New York Times gazetesinde kullanılan bir kelimenin bir önceki kullanımından sonra kullanılma ihtimalini zamanının bir fonksiyonu olarak göstermektedir

olasılıkla muhtemel olan şeyleri hazırda bulunduracak şekilde beynin gerçek dünyaya kusursuz bir uyarlamasıdır.

Zaman kavramı dikkate alındığında, önbellek işlemi bize hafızanın kaçınılmaz karşılıklı tavizler ve kesin sıfır toplamı oyunları içerdiğini göstermektedir. Tüm kitapları masanızda, tüm ürünleri vitrininizde, her başlığı gazete katlandığında en üstte görünecek şekilde, her evrakı yığının en tepesinde bulundurmazsınız. Aynı şekilde, her isim ya da olayı zihninizde en önde bulunduramazsınız.

Anderson ve Schooler şöyle yazmışlardı: “Birçok kişi insan zihninin kesinlikle optimal olmadığına dair ön yargılıdır. Hafızanın başarısızlıklarına işaret etmişlerdir. Ancak bu eleştiriler insan zihninin başarması gereken göreve gereken saygıyı göstermemektedir ve bu görev devasa bir hafıza yığınının idare etmektir. Büyük bir veri tabanı idare etmekten sorumlu herhangi bir sistemde bilgiyi çağırmada başarısızlıklar olmalıdır. Sınırsız sa-

yıdaki şeye erişim sağlamak çok ama çok masraflıdır.”

Bu anlayış, sonrasında insan hafızası hakkında ikinci bir açılıma neden olmuştur. Bu karşılıklı tavizler gerçekten kaçınılmaz ve beyin gerçekten etrafındaki dünyaya optimal biçimde uyum sağlıyor ise yaşlanmayla birlikte gelen kaçınılmaz “zihni çöküş” aslında başka bir şey olabilir.

Tecrübe Zulmü

Kitap aslında büyük bir sıkıntıdır.

—CALLIMACHUS (M.Ö. 305-410),

İskenderiye’de kütüphaneci

Tüm uçağı neden tamamen bu kara kutu denen şeyden olacak şekilde yapmıyorlar ki?

—Steven Wright

Kullandığımız bilgisayarların önbellek basamakları şeklinde tasarlanmış olmasının sebebi, hafıza hiyerarşisinde duyulan ihtiyacın tümünün en pahalı donanımla karşılanmasının aşırı masraflı olmasıdır. Örneğin mevcut bilgisayarlardaki en hızlı önbellek, flash belleklerden oluşan SSD sürücülerden bayt başına yaklaşık bin kat daha maliyetli olan SRAM denilen şeyle yapılmaktadır. Ancak önbellek işlemlerindeki gerçek motivasyon bundan daha derinlere uzanmaktadır. Hatta, mümkün olan en hızlı hafıza türünden özel sipariş bir cihazımız olsa bile yine de önbelleklere ihtiyacımız olurdu.

John Hennessy’nin de ifade ettiği gibi boyut bile tek başına hızı düşürmek için yeterlidir.

Bir şeyi daha büyük yaptığınızda bu şey daha doğuştan itibaren yavaştır, değil mi? Eğer bir şehri daha büyük bir şekilde

inşa ederseniz A noktasından B noktasına gitmeniz daha uzun sürer. Eğer bir kütüphaneyi daha büyük yaparsanız bir kitabı bulmak daha uzun sürer. Eğer masanızın üzerinde daha büyük bir deste evrak olursa o zaman aradığınızı bulmak daha uzun sürer, değil mi? Önbellekler aslında bu soruna bir çözümdür... Örneğin şimdi bir işlemci satın aldınız. Çip üzerindeki L1 ve L2 (Level 1, Level 2 cache) birer önbellektir. Sadece çipte bile iki adet önbellek olmasının nedeni, işlemcinin devir hızıyla baş edebilmek için L1 önbelleğin boyut olarak sınırlı kalmasıdır.

Daha büyük bir hafıza kaçınılmaz olarak, bir bilgiyi aramak ve çekmek için daha fazla zaman harcanacağı anlamına gelmektedir.

Otuzlu yaşlarında olan Brian ile Tom sohbetleri sırasında ismi dillerinin ucunda olan birinin adının akıllarına gelmesi için daha sık bir şekilde duraksadıklarını fark etmişlerdi. Brian'ın 10 yaşındayken iki düzine kadar sınıf arkadaşı vardı; 20 yıl sonra ise telefonunda yüzlerce, Facebook'ta ise binlerce arkadaşının adı kayıtlıydı ve dört şehirde yaşamış, her birinde ayrı bir çevresi olmuş ve arkadaşlarının tanıdığı kişilerle görüşmüştü. Tom ise aynı dönem içerisinde akademik kariyeri boyunca yüzlerce meslektaşıyla birlikte çalışmış ve binlerce öğrenciye ders vermişti. (Aslında, bu kitapta konuyla ilgili olarak yaklaşık yüz kişiyle görüşülmüş ve binden fazla alıntı yapılmıştır.) Bu tarz etkiler elbette ki hiçbir şekilde sosyal bağlantılarla sınırlı değildir. İki yaşındaki sıradan bir çocuk 200 kelime bilir, sıradan bir yetişkin ise 30.000 kadar. Ve bölümlü hafıza söz konusu olduğunda yaşanan her sene bir kişinin yaşam tecrübesine yaklaşık 330.000 dakika eklemektedir.

Bu açıdan bakıldığında ikimizin -ya da herhangi iki kişinin-

zihnen birbirlerine yakın olması bir mucize gibidir. Şaşırtıcı olan şey hafızanın yavaşlaması değil, zihnin bu kadar veri birikimine rağmen hayatta kalabilmesi gerçeğidir.

Eğer hafızanın temel sorunu saklama alanından ziyade düzenleme ise, belki de bu durum bizim yaşlanmanın zihni yeteneklerimiz üzerinde olan etkileri hakkında düşünme şeklimizi değiştirmelidir. Tübingen Üniversitesi'nden Michael Ramscar yönetimindeki psikolog ve dil bilimcilerden oluşan bir ekibin yakın zamanlarda yaptığı bir çalışma, “düşünsel düşüş” dediğimiz -duraksamalar ve hatırlama zorlukları- şeyin arama sürecinin yavaşlaması ya da kötüleşmesiyle ilgili olmadığını, (en azından kısmen) içerisinde arama yapmak zorunda olduğumuz bilginin boyutunun gittikçe daha büyümesinden kaynaklandığını ileri sürmüştür. Yaşlanmanın beraberinde getirdiği diğer sıkıntılardan bağımsız olarak daha yaşlı beyinler -daha fazla hatıranın yer aldığı bir saklama alanını yönetmek zorunda olan beyinler- kelimenin tam anlamıyla her geçen gün daha zorlu hesaplama problemleri çözmektedir. Yaşlılar gençlerin hızlarıyla dalga geçebilirler: “Daha hiçbir şey bilmediğiniz için bu kadar çabuk hatırlayabiliyorsunuz!”

Ramscar'ın grubu ekstra bilginin insan hafızası üzerindeki etkisini dil örneğine odaklanarak gösterdi. Araştırmacılar bir dizi simülasyon aracılığıyla iş kelimeleri, isimleri hatta harfleri hatırlamak olduğunda sadece daha fazla şey bilmenin bile bu işleri ne kadar zorlaştırdığını gösterdi. Düzenleme planınız ne kadar iyi olursa olsun, daha fazla şey arasında arama yapmak zorunda olmak kaçınılmaz bir şekilde daha uzun sürecektir. Unuttuğumuzdan değil, hatırladığımız için daha uzun sürmektedir. Âdeta birer arşiv hâlini almaktayız.

Ramscar, hafızanın o kaçınılmaz işlem taleplerini anlamının insanlara, yaşlanmanın zihin işlemleri üzerindeki etkilerini anla-

maya yardım etmesi gerektiğini söylemektedir. “Yaşlıların yapabilecekleri en önemli somut şeyin, zihinlerinin doğal birer bilgi işlem cihazları olduğunu anlamalarıdır. Yaşlanırken daha kötüymüş gibi görünen bazı şeyler (isimleri hatırlamak gibi) aslında işlem yapmak zorunda olduğumuz şeylerin bir fonksiyonudur ve buradaki yavaşlama kötü bir zihin yapısının işareti olmak zorunda değildir. Azalma ya da düşüş olarak adlandırılan şey ise aslında öğrenmedir.”

Önbellek işlemi bize nelerin olduğunu anlamamızı sağlayacak dili sunmaktadır. Aslında “önbellek hatası” dememiz gerekirken “akıl tutulması” deriz. Bilgiyi hatırlamaya çalışırken arada sırada yaşanan orantısız duraksamalar, esasen diğer zamanlarda lazım olan bilginin zihnimizin ön tarafında hazır bulunmasının bizim için ne kadar yararlı olduğunu hatırlatan bir durumdur.

Yani, yaşlandıkça ve bu bölümlenmiş gecikmeleri yaşamaya başladıkça cesaretinizi artırın. Gecikmenin uzunluğu kısmen sizin tecrübenizin genişliğinin bir göstergesidir. Hatırlama için katlanılan çaba sizin ne kadar çok şey bildiğinizin de bir ispatıdır. Ve bu beklemlerin nadirliği, sizin bunu ne kadar düzenli bir şekilde sakladığınızın göstergesidir: En önemli şeyleri hafızada el altında ve hazır tuttuğunuzun göstergesi.

5

Çizelgeleme (Scheduling)

İlk Önce Öncelikler

Günlerimizi nasıl geçirdiğimiz, elbette ki hayatımızı nasıl geçirdiğimizdir.

—Annie DILLARD

“Çizelgeleme teorisi üzerine neden bir kitap yazmıyoruz?” diye sordum... “Çok uzun sürmemeli!” Tıpkı savaşı gibi, kitap yazmak da genellikle ciddi boyutlarda yanlış hesaplamalar içerir. On beş senedir kitap hâlâ bitmedi.

—Eugene LAWLER

Günlerden Pazartesi ve sabah saatleri. Elinizde boş bir çizelge ve tamamlanması gereken işlerden oluşan uzun bir liste var. Bazıları sadece bir görevin tamamlanmasından sonra başlanabilecek türden (bulaşık makinesini boşaltmadan kirli bulaşıkları içine yerleştiremezsiniz) ve bazıları da sadece belirli bir zaman geldiğinde başlanabilecek türden (eğer çöpünüzü Salı akşamından önce sokağa çıkarırsanız komşularınız sizi şikâyet edecektir). Bazılarının çok kesin bitiş tarih ve saatleri vardır, diğerleri ise istenilen zamanda yapılabilir ve birçoğu da bu iki durumun

arasında bir özelliğe sahiptir. Bazıları acildir ancak çok da önemli değildir. Bazıları ise önemlidir fakat acil değildir. Aristo'nun "Bizler sürekli tekrarladığımız şeyden ibaretiz" dediği aklınıza gelir; yeri süpürmek, çocuklarınızla daha fazla zaman geçirmek, vergilerinizi zamanında ödemek ve Fransızca öğrenmek istersiniz.

Peki o zaman ne yapacaksınız, ne zaman yapacaksınız ve bunu hangi sıra ile yapacaksınız? Hayatınız sizi bekliyor.

Gün içerisinde yaptığımız şeyleri bir sıraya sokmanın bir şekilde yolunu buluyor olsak da kural olarak kendimizi bu konuda çok iyi olarak görmeyiz, zamanı yönetmek üzerine yazılan ve çok satan kitaplar da bizi iyi görmez. Fakat ne yazık ki bu kitaplarda bulduğumuz yol gösterici bilgiler genellikle farklı ve tutarsızdır. *İş Bitirici (Getting Things Done)* kitabı iki dakika ya da daha kısa sürecek işleri süratle yapmayı içeren bir politikayı savunur. Bu kitabın rakibi olan ve çok satanlar arasında yer alan *Eat That Frog! (Şu Kurbağayı Ye!)* kitabı ise bizlere en zor görevden işe başlama ve daha kolaylara doğru ilerleme tavsiyesini verir. *The Now Habit (Şimdiki Alışkanlıklarımız)* ise genelde yaptığımıza ters olarak, bir kişinin ilk önce sosyal işlerini ve boş zamanlarını planlamasını ve daha sonra kalan boşlukları diğer işlerle doldurmasını önerir. "Amerikan psikolojisinin babası" William James, "tamamlanmamış bir işe saplanıp kalmak kadar insanı tüketen başka bir şey yoktur" derken Frank Partnoy ise *Wait (Bekle)* isimli eserinde kasıtlı olarak bir şeyleri hemen yapmamayı savunmaktadır.

Her uzmanın farklı bir sistemi vardır ve kimi dinleyeceğinizi bilmek zordur.

Vakit Geçirmek Bir Bilim Oluyor

Zamanı yönetmek zamanın kendisi kadar eski bir sorun olarak görülmesine rağmen çizelgeleme bilimi endüstri devrimi zamanında makine tezgâhlarında başlamıştır. Varlıklı bir avukatın oğlu olan Frederick Taylor 1874'te Harvard'a kabul mektubunu, Philadelphia'da bulunan Enterprise Hydraulic Works'de maki-nist çırağı olmak için geri çevirdi. Dört yıl sonra çıraklığını tamamladı ve Midvale Steel Works'de çalışmaya başladı ve burada torna tezgâhı operatörlüğünden makine tezgâh ustabaşılığına, en sonunda da başmühendisliğe yükseldi. Bu süreçte, sorumlu olduğu makinelerin (ve insanların) zamanı iyi bir şekilde kullanmadığını düşündü ve bu nedenle “bilimsel yönetim” adını verdiği bir disiplin geliştirdi.

Taylor, herkesin görebileceği bir yere asılan ve atölyenin işle-rini gösteren bir panodan ibaret olan planlama ofisi kurdu. Pano atölyedeki tüm makineleri, her bir makine tarafından o anda yapılmakta olan işi ve bekleyen işleri göstermekteydi. Bu uygulama, Hoover Barajı'ndan Interstate Otobanı'na kadar 20'nci yüzyılın birçok iddialı inşaat projelerine katılan Taylor'ın meslektaşları Henry Gantt (1910'da Gantt Şemasını geliştirmiştir) tarafından daha da geliştirildi. Yüzyıl sonra bile Gantt Şemaları hâlen Amazon, IKEA ve SpaceX gibi şirketlerdeki proje yöneticilerinin duvarlarında yer almaya devam etmektedir.

Taylor ve Gantt çizelgelemeyi bir çalışma alanı hâline getire-rek buna görsel ve kavramsal bir şekil verdiler. Ancak hangi çizelgelerin en iyisi olduğuna dair temel problemi çözüme kavuşturmadılar. Bu sorunun çözülebileceğine dair ilk ipucu ise 1954 senesinde RAND Şirketi'nde matematikçi olarak görev yapan Selmer Johnson tarafından yayımlanan bir yazıya kadar ortaya çıkmadı.

Johnson'ın üzerinde çalıştığı senaryo kitap ciltlemeydi. Her

kitap baskı makinesinde basılmakta ve başka bir makinede ciltlenmekteydi. İki makine içeren bu kurgunun evlerimizdeki örneği, çamaşır yıkama ve kurutma makinesidir. Çamaşırlarınızı yıkamak istediğinizde bu çamaşırlar sırasıyla önce çamaşır, sonra da kurutma makinelerinden geçmek zorundadır ve her seferinde makinelere yüklenen farklı miktardaki çamaşır nedeniyle işlem farklı sürelerde tamamlanacaktır. Oldukça lekeli çamaşırları yıkamak normalden daha uzun sürerken kurutmak, normal zamanda tamamlanabilir fakat daha fazla miktardaki çamaşırı kurutmak daha uzun sürerken, bunları yıkamak ise nispeten normal bir sürede tamamlanabilir. Bu nedenle Johnson şu soruyu sormuştu: Eğer aynı gün çeşitli miktarlarda yıkamanız gereken çamaşırınız var ise bunu yapmanın en iyi yolu nedir?

Onun cevabı en kısa zamana ihtiyaç duyacak adımdan başlamakti. En kısa sürede yıkanacak *ya da* kurutulacak çamaşır yükü grubunu bulmak gerekiyordu. Eğer bu en kısa süre yıkama adımıyla ilgili ise bunu *ilk olarak* yapmayı planlayın. Eğer bu en kısa süre kurutucu için ise, bunu *en son* yapmayı planlayın. Bu süreci kalan işler için tekrarlayın ve çizelgenin iki ucundan başlayıp ortaya doğru ilerleyerek çizelgeyi hazırlayın.

Johnson'ın algoritması içgüdüsel olarak işe yaramaktadır çünkü çamaşırları nasıl sıraladığınızdan bağımsız bir şekilde başlangıçta çamaşır makinesinin çalıştığı lakin kurutma makinesinin çalışmadığı bir zaman süreci ve en sonunda kurutma makinesinin çalıştığı fakat çamaşır makinesinin çalışmadığı bir zaman dilimi olacaktır. En kısa yıkama sürelerine başta, en kısa kurutma sürelerine ise sonda sahip olarak her iki makinenin de eş zamanlı olarak çalıştığı zaman miktarını maksimize etmekte-sinizdir. Bu şekilde çamaşır yıkama ve kurutmada geçen toplam süreyi de minimum değerde tutmuş olursunuz. Johnson'ın analizi çizelgelemenin ilk optimal algoritmasıyla sonuçlanmıştı: En

kısa yıkamayla başla, en kısa kurutmayla bitir.

Johnson'ın makalesi hemen uygulamaya geçirilmesinin yanı sıra daha derin anlama sahip iki nokta daha ortaya çıkarmıştı. İlk olarak, bu çizelgeleme işlemi algoritmik olarak ifade edilebilirdi. İkinci olarak da optimal çizelgeleme çözümleri mevcuttu. Bu sonuç bir anda patlama yaşayan bir literatüre neden oldu ve her türden, çok değişik sayılarda makinelerden oluşan fabrikaların yönetimine ilişkin stratejiler araştırılmaya başlandı.

Biz bu literatürün sadece küçük bir kesimine odaklanacağız. Kitap ciltleme ve çamaşır yıkamanın aksine *tek* makine için çizelgelemeyle ilgileneceğiz. Çünkü en önemli çizelgeleme problemleri sadece tek makine içermektedir: Kendimiz.

Son Teslim Tarihlerinin Yönetimi

Tek makinedeki çizelgeleme işlemlerinde en baştan bir sorunla karşılaşırız. Johnson'ın kitap ciltleme üzerine olan çalışması, iki makinenin ellerindeki tüm işleri tamamlamak için gerekli zamanı minimize etmesi üzerine kuruluydu. Fakat tek makineli çizelgeleme durumlarında eğer verilen görevlerin tamamını yapacak-sak hangi sırada olursa olsun bunları tamamlamak toplamda aynı süreyi gerektirecektir, sıralama burada alakasız bir unsurdur.

Bu, tekrarlanmaya değer derecede temel ve kullanışsız bir durumdur. Eğer sadece tek makineniz varsa ve elinizdeki tüm işleri yapacaksanız, yapacağınız herhangi bir sıralama sonucu iş süresi hep aynı olacaktır.

Bu nedenle tek makineli çizelgeleme problemine ilişkin ilk dersimizle, daha bu konuya başlamadan önce karşılaşmaktayız: *Amaçlarınızı açık bir şekilde belirleyin.* Bir çizelgeyi, nasıl puanlayacağımızı bilene kadar kazanan olarak açıklayamayız. Bu da bilgisayar bilimindeki bir temaya benzemektedir. Plan yapmadan önce, ilk olarak bir ölçüt seçmelisiniz. Ve sonuçta seçece-

ğımız ölçüt, hangi çizelgeleme yaklaşımının ne kadar iyi sonuç vereceğini doğrudan etkileyecektir.

Tek makineli çizelgeleme konusundaki akademik yazılar Johnson'ın kitap ciltleme çalışmasının peşi sıra geldi ve dikkate alınacak çeşitli akla yatkın ölçütler sundular. Her ölçüt için basit ve optimal bir strateji buldular.

Elbette ki belli bir teslim süresi olan işler için bu işin gecikmesi, onun teslim edilmesi gereken zaman ile teslim edildiği zaman arasında kalan bölümdür. Yani bir grup iş kaleminin “maksimum gecikmesini”, teslim tarihinden sonra en geç teslim edilenin gecikmesi olarak düşünebiliriz. Bunu, bir çalışanınızın performans değerlendirmesinde dikkat etmesi gereken bir kriter gibi düşünebilirsiniz. (Ya da müşterilerinizin bir perakende dükkânı ya da hizmet noktasında en uzun bekleme zamanına maruz kalmaları şeklinde algıladıkları bir durum.)

Eğer maksimum gecikmeyi minimize etmekle ilgileniyorsanız en iyi strateji, işe teslim tarihi en yakın olan işten başlamak ve en uzak olana doğru ilerlemektir. **En Erken Teslim Tarihi (Earliest Due Date)** olarak bilinen bu stratejinin kullanımı oldukça kolaydır. (Örneğin, hizmet sektörü bağlamında düşünüldüğünde bir müşterinin işinin “teslim tarihi” aslında kapıdan içeri adımını attığı andır ve bu da müşterilere geliş sıralarına göre hizmet verilmesi anlamına gelmektedir.) Bunun bazı uygulamaları oldukça şaşırtıcıdır. Örneğin, her bir işin tamamlanmasının ne kadar süreceği konuyla ilişkili değildir. Planı değiştirmez. Aslında bunu bilmenize gerek bile yoktur. Tek bilmeniz gereken miatların ne olduğudur.

Bilgisayar teknolojisinin size bunun mantıklı bir strateji olduğunu söylemesine gerek bile kalmadan bu stratejiyi iş yükünüzü idare etmekte kullanıyor olabilirsiniz. Bilmiyor olabileceğiniz şey ise bunun *optimal* strateji olduğudur. Daha da açıkça belirt-

mek gerekirse, sadece tek ölçütle ilgilendiğiniz varsayıldığında optimaldir: Maksimum gecikmeyi azaltmak. Eğer amacınız bu değilse, o zaman başka bir strateji daha faydalı olabilir.

Örneğin buzdolabını ele alalım. Eğer taze meyve-sebze alan birçok kişiden biriyseniz, her hafta ya da iki haftada bir kapınıza kadar taze pek çok ürün geliyor demektir. Her ürünün bozulacağı farklı bir zaman mevcuttur. Bu nedenle bunları bozulma zamanları çizelgesine göre En Erken Teslim Zamanlarından önce tüketmek akla yatkın bir başlangıç noktası gibi görünmektedir. Ancak her şey bununla bitmemektedir. En Erken Teslim Zamanı maksimum gecikmeyi azaltmakla ilgilidir ve bozulmuş olan bir yiyeceğin bozulma süresini minimize edecektir. Bu seçenek en lezzetli ve sağlıklı seçenek olmayabilir.

Belki de bunun yerine bozulacak olan besinlerin *miktarını* minimize etmek isteriz. Burada da bize en iyi planı **Moore Algoritması** sunmaktadır. Moore Algoritması, En Erken Teslim Zamanı stratejisi gibi başlamamızı, yani ürünleri bozulma zamanlarına göre çizelgeleyerek başlamamızı söylemektedir. İlk olarak en erken bozulacak olan, daha sonra ondan sonra bozulacak olan şekilde her seferinde bir besin sıralarız. Daha sonra sıra bozulmadan yiyemeyeceğimiz bir besine geldiğimizde durur ve o ana kadar planlamış olduğumuz besinlere bakar ve en büyük (tüketilmesi en uzun sürecek olanı) listeden çıkarırız. Örneğin bu, altı dilim şeklinde tüketilebilecek olan bir karpuzdan vazgeçmek anlamına gelebilir. Daha sonra bu yaklaşımı, her seferinde besinleri bozulma tarihlerine göre sıralayarak ve en fazla miktarda olanı liste dışına atarak devam ettiririz. Bütün besinleri bozulmadan yenebilecek duruma getirdiğimizde planımızı elde etmiş oluruz.

Moore Algoritması atmak zorunda olduğunuz besin çeşidi sayısını minimize eder. Bu besinleri elbette gübre olarak kulla-

nabilir, komşularınıza ya da ihtiyacı olanlara verebilirsiniz. Endüstriyel ya da bürokratik bir açıdan ele aldığınız konularda ise geciken projeler söz konusu olduğunda -projelerin öneminden ziyade sayısı- Moore Algoritması bu durumun halledilmesinde tarafsız bir şekilde iş görecektir. Çizelgenizin ana bölümünün dışına atılan projeler, herhangi bir sıralamada olacak şekilde en sonda yapılabilirler. Hepsi zaten geç kalınmış olduğu için sıralama burada bir anlam taşımaz.

İşleri Bitirmek

Zor şeyleri henüz basitken, harika şeyleri de daha küçükken yapın.

—Lao TZU

Teslim tarihi bazen bizim önceliğimiz değildir ve sadece işleri bitirmek isteriz. Mümkün olduğu kadar fazla şeyi tamamlamak isteriz. Bu durumu açıklamak görüldüğünden zordur ve daha açık ve anlaşılır bir anlatım gerektirmektedir.

Buradaki yaklaşımlardan bir tanesi dışarıdan birinin bakış açısını takındır. Tek makineli çizelgelemede, ne yaparsak yapalım tüm görevleri tamamlamamız için ihtiyacımız olan süreyi değiştiremediğimizi öğrendik. Fakat örneğin, her bir iş beklemekte olan bir müşteriye temsil ederse o zaman bekleyecekleri toplam zamanı mümkün olduğu kadar kısaltmanın bir yolu vardır. Pazartesi sabahına dört günlük ve bir günlük iki ayrı projeyle başladığınızı hayal edin. Eğer daha uzun zaman gerektiren projeyi Perşembe günü öğleden sonra (dört gün geçmiş bir şekilde) ve daha az zaman gerektireni Cuma öğleden sonra (5 gün geçmiş bir şekilde) teslim ederseniz müşteriler toplamda $4+5=9$ gün beklemiş olacaklardır. Lakin eğer iş sırasını tersine çevirir ve küçük işinizi Pazartesi öğleden sonra, büyük işinizi Cuma öğle-

den sonra teslim edebilirsiniz ve müşteriler toplamda sadece $1+5=6$ gün beklemiş olurlar. Her iki seçenekte sizin için bir haftalık iş mevcuttur ama ikinci seçenekte müşterilerinize toplamda üç gün kazandırmış olursunuz. Çizelgeleme teorisyenleri bu ölçüte “toplam tamamlanma zamanı (sum of completion time)” demektedir.

Toplam tamamlanma zamanını minimize etmek bizi **En Kısa İşlem Süresi (Shortest Processing Time)** isimli çok basit bir optimal algoritmaya götürmektedir: Her zaman elinizde mevcut en kısa işi bitirin.

Her işte sabırsız bir şekilde beklemekte olan müşterileriniz olmasa bile En Kısa İşlem Süresi işlerin *bitirilmesini* sağlar. (Belki de *İş Bitirici* kitabında iki dakikadan daha kısa sürecek şeyleri hemen bitirmenin tavsiye edilmesiyle bu algoritmanın uyumlu olması şans değildir.) Ve yine toplam iş zamanının sizin açınızdan değişmesinin bir yolu yoktur ama En Kısa İşlem Süresi algoritması mümkün olan en fazla sayıda işi listeden çıkararak kafanızın rahatlamasına neden olabilir. Buradaki toplam tamamlanma zamanı ölçütü bir başka şekilde de ifade edilebilir: Her şeyden çok yapılacak listenizin uzunluğunu azaltmaya odaklanın. Eğer tamamlanmamış her bir iş parçası sizi rahatsız eden bir diken gibi ise, o zaman en kolay işleri halletmek biraz rahatlık hissi sağlayacaktır.

Elbette ki tamamlanmamış işlerin tamamı eşit bir şekilde yaratılmamıştır. Mutfaktaki yangını söndürmek, bir müşteriye e-posta göndermekten daha uzun sürse de daha önce halledilmelidir. Çizelgeleme problemlerinde bu önem farkı *ağırlık* olarak bilinen bir değişkenle sağlanır. Yapılacaklar listenizi gözden geçirirken bu ağırlığın karşılıklı olduğunu görürsünüz. Bitirdiğiniz her iş kalemiyle azalacaktır. Bir işin tamamlanma süresi bu yükü ne kadar taşıdığınızı gösterir. Bu nedenle de ağırlıklı ta-

mamlanma zamanlarının toplamını (yani her bir işin süresinin kendi ağırlık değeriyle çarpılarak toplanması) minimize etmek, planınız doğrultusunda çalışırken üzerinizdeki baskıyı minimize etmek anlamına gelir.

Bu amaç için optimal strateji En Kısa İşlem Süresi yaklaşımının üzerinde yapılacak basit bir değişikliktir. Her işin ağırlığını, o işin tamamlanması için gerekli zamana bölmek ve daha sonra çıkan birim zamana düşen önem derecesi (eğer ağırlık mantığı üzerinden devam etmek isterseniz buna *yoğunluk* diyebilirsiniz) en yüksek olandan en düşük olana doğru ilerlersiniz. Ve günlük işlerinizin her birine bir önem derecesi vermek zor olsa da bu strateji iyi bir onaylama kuralı sunmaktadır. İki kat uzun sürecek bir işi, sadece iki kat önem arz ediyorsa önceliklendirin.

İşletmeler bakımından “ağırlık” her bir işin getireceği para miktarı cinsinden kolaylıkla ifade edilebilir. Bu nedenle para miktarını süreye bölme anlayışı her bir işe saatlik bir oran tahsis etmek anlamına gelir. (Eğer bir danışman ya da serbest çalışan-sanız bu durum sizin için hemen uygulanabilir. Sadece her projenin ücretini onun boyutuna bölün ve saatlik getirisi en yüksek olandan düşük olana doğru çalışın.) Bu ağırlıklandırılmış strateji, aynı zamanda dolar ve sentlerin yerini fındık ve yaban mersinlerinin almasıyla kendisini ilginç bir şekilde hayvanların yiyecek arama eylemlerinde de göstermektedir. Gıdadan aldıkları enerji miktarını maksimize etmeyi amaçlayan hayvanlar kalori cinsinden enerjinin, gıdayı bulmak ve yemek için gerekli olan zamana oranına göre yiyeceklerin peşine düşmelidir ve görünüşe göre bu stratejiyi uygulamaktadırlar.

Bu yaklaşım kâra geçme amaçlı bir şekilde gelir yerine borçlara uygulandığında, borçlarınızın sayısını ve miktarını tamamen göz ardı etmenizi ve paranızı sadece tek başına en yüksek faiz oranına sahip borcunuza aktarmanızı söylemektedir. Bu, birim

zamandaki önem derecesine göre işiniz üzerine düzenli çalışmaya karşılık gelmektedir. Ve bu yaklaşım, mümkün olduğu kadar çabuk bir şekilde toplam borç yükünüzü azaltacak olan stratejidir.

Diğer bir taraftan eğer borcun miktarından ziyade sadece sayısını azaltmakla ilgileniyorsanız -ödeyeceğiniz faizin çok sayıdaki fatura kadar önem arz etmediği durumda- yine ağırlıklandırılmamış, “sadece şu işi bitireyim” tadına sahip, en az miktardaki borçları aradan çıkarmak adına En Kısa İşlem Süresi yaklaşımına geri dönersiniz. Bu yaklaşım borç azaltma çevrelerince “borç kartopu” olarak bilinmektedir. İnsanların uygulamada borçlarının dolar cinsinden miktarını mı yoksa sayısını mı azaltmayı öncelik olarak seçmesi gerektiği hem popüler basın hem de ekonomi araştırmacıları açısından tartışmalara hâlen neden olmaktadır.

Sorunlarımızı Seçmek

Bu durum bizi, tek makineli çizelgeleme konusundaki tartışmamıza başladığımız yere tekrar getirir. “Sadece bir saati olan kişinin saatin kaç olduğunu bildiği, iki saati olan kişinin ise asla emin olmadığı” söylenir. Bilgisayar bilimi bize tek makineli çizelgelemede mevcut bazı ölçütler için optimal algoritmalar sunabilir lakin takip etmek istediğimiz ölçütü seçmek bize kalmıştır. Birçok durumda çözmek istediğimiz problemin ne olduğuna biz karar vermek durumunda kalırız.

Bu durum gecikme olgusunu yani, zaman yönetiminin klasik patolojisini yeniden düşünmek için radikal bir yol önerir. Biz bunu genellikle hatalı bir algoritma olarak görürüz. Peki ya eğer durum bunun tam tersi ise? Ya bu yaklaşım, yanlış bir problemin çözümü ise?

Gizli Dosyalar (X-Files) dizisinin, kahramanı Mulder'in yata-lak olduğu ve takıntılı bir vampir tarafından öldürölmek üzerey-ken bir poşet çekirdeği kendini korumak adına yere döktüğü sah-nenin yer aldığı bir bölümü vardır. Takıntılarına karşı koyama-yan vampir dökölen çekirdekleri tek tek toplamaya koyulur ve güneş doğmadan Mulder'ı öldürmekte başarısız olur. Bilgisayar mühendisleri buna “hizmet dışı bırakma (denial of sevice)” sal-dırısı demektedir. Bir sisteme yapabileceğinden çok daha fazla önemsiz iş verin ve önemli şeylerin kaos içinde kaybolmasını sağlayın.

Gecikme olgusunu genellikle tembellik ya da kaçınma davra-nışlarıyla ilişkilendiririz fakat bu olgu, işleri en içten ve tutkulu biçimde ve de en kısa zamanda halletmeye çalışan kişilerde (ya da bilgisayar veya vampirlerde) de kolaylıkla görölebilmektedir. Pennsylvania Eyalet Üniversitesi'nden David Rosenbaum'un liderliğini yaptığı 2014 senesine ait bir çalışmada katılımcılardan iki adet ağır sepetten herhangi birini koridorun diğer tarafına getirmeleri istenmiştir. Sepetlerden biri katılımcının hemen ya-nında, diğeri ise koridorun ortasında yer almaktaydı. Deneyi icra edenlerin şaşkın bakışları arasında insanlar, hemen yanlarındaki sepeti almış ve koridorun ortasında bulunan sepetin yanından geçirerek tüm koridor boyunca taşımışlardır. Araştırmacılar bu-nunla ilgili olarak şu ifadeyi kaleme almışlardır: “Görünüşte mantıksız olan bu seçim, ekstra fiziksel efor gerektirse de erteleme (pre-crastinate) diye tabir edilen ve alt hedefleri tamamlamak adına eylemde bulunma anlamına gelen seçeneği tercih ettikleri-ni yansıtmaktadır.” Önemli bir projedeki işleri erteleyerek bunun yerine küçük, önemsiz pek çok konuyla ilgilenmek de yukarıda-ki çalışmaya benzer bir şekilde “alt hedeflerin tamamlanması için acele etmek” olarak görölebilir. Bu, böyle yapanların aslın-da akıllarında beklemekte olan işlerin sayısını mümkün olduğu

kadar çabuk bir şekilde azaltmak için (optimal!) hareket ettiklerini göstermektedir. İşlerin tamamlanması için kötü bir stratejileri olduğundan değil, yanlış bir ölçüt için harika bir stratejileri olduğundan böyle yaparlar.

Ölçütlerimizi çizelgelerken ve planlarken bilgisayar üzerinde çalışmanın birtakım tehlikeleri olabilir. Kullanıcı arayüzü ince (ya da çok ince olmayan) bir şekilde kendi ölçütünü bize dayatıyor olabilir. Örneğin modern bir akıllı telefon kullanıcısı, uygulama kısayollarının üzerinde kırmızı üzerine beyazla yazılmış rakamları içeren (bildirimler) ve her bir uygulamanın bizden tamamlamamızı beklediği işleri işaret eden küçük “etiketleri” görmeye alışkındır. Eğer bu, e-postalarımızın okunmamış iletilerini gösteren sayısı ise o zaman tüm postalar aynı ağırlığa sahip demektir. Peki, o zaman ağırlıklandırma içermeyen En Kısa İşlem Süresi algoritmasını bu numarayı en hızlı biçimde azaltacak şekilde bu probleme uygularsak (önce en kolay e-postalarla ilgilenmek ve en zorlularını sona bırakarak) suçlu mu oluruz?

Ölçütlerle yatıp ölçütlerle kalkmak. Eğer tüm işler tamamen eşit önem ve ağırlığa sahip olsaydı, o zaman yapmamız gereken şey de tam olarak bu olurdu. Eğer önemsiz ayrıntıların köleleri olmak istemiyorsak buna göre tedbirler almamız gerekir. Burada da ilk adım, çözmekte olduğumuz tek makineli problemin çözmek istediğimiz problem olduğundan emin olmaktır. (Uygulamadaki etiketler örneğinde, eğer bunların bizim gerçek önceliklerimizi yansıtmamasını sağlayamıyor ve gözümüze sokulan bu numerik figürleri optimal bir şekilde azaltmak dürtüsüne karşı koyamıyorsa, o zaman belki de yapılacak en iyi şey bu etiketleri devre dışı bırakmaktır.)

Sadece işlerin tamamlanmasına değil, aynı zamanda belirli bir ağırlığa sahip işlerin de tamamlanmasına -yani her an eldeki mevcut işlerden en önemlisini yapmak- odaklanmış bir şekilde

kalmak, kulağa gecikmeler için bir çare gibi gelmektedir. Ancak bunun bile yeterli olmadığı ortaya çıkmaktadır. Ve bir grup bilgisayar çizelgeleme uzmanı bu dersle en dramatik biçimde karşılaşacaklardı: Tüm dünya izlerken Mars'ın yüzeyinde.

Önceliğin Tersine Çevrilmesi (Priority Inversion) ve Öncüllük Kısıtları (Precedence Constraints)

1997 senesinin yaz mevsimiydi ve insanlığın kutlayacağı çok şeyi vardı. Tarihte ilk defa bir kâşif, Mars'ın yüzeyinde gezinmekteydi. 150 milyon dolar değerindeki Mars Pathfinder uzay aracı saatte yaklaşık 25.000 km hıza ulaşarak yaklaşık 500 milyon kilometrelik geniş uzay boşluğunda seyahat etti ve kayalık Mars yüzeyine uzayda kullanılan hava yastıkları yardımıyla indi.

İndiği yerde erteleme sorunuyla karşılaştı.

Dünya'da Jet Propulsion Laboratory (JPL)'de bulunan mühendisler hem endişeli hem de cevap bulamaz bir hâldeydiler. Pathfinder'in en yüksek öncelik dereceli görevi ("bilgi otobüsü" denilen bölümüne veri sokmak ve çıkarmak) robot tarafından gizemli bir şekilde orta dereceli öneme haiz görevler nedeniyle göz ardı edilmekteydi. Neler oluyordu? Robot daha iyisini bilmiyor muydu?

Pathfinder, dünyaya aniden bilgi otobüsünün uzun bir süredir işlemediğini bildirdi ve yedek hafızasının eksik olması nedeniyle kendisini yeniden başlattı. Yeniden çalışabilir hâle gelmesi bir günlük çalışma zamanına mal oldu. Bir gün kadar sonra ise aynı şey yeniden gerçekleşti.

JPL ekibi deliler gibi çalışarak sorunu giderdi ve nedenini tespit etti. Olayın zanlısı, *önceliği tersine çevirmek* denilen klasik bir çizelgeleme sorunuydu. Burada olan şey; düşük öncelikli bir iş, sistem kaynaklarından birini almış (diyelim ki veri tabanına erişim sağlamak olsun) ancak daha sonra bir zamanlayıcı ne-

deniyle ortalarda bir yerlerde kesilmişti. Bu işlem sistem planlayıcısını duraklatmıştı. Görev planlayıcısı (scheduler) yüksek öncelikli bir işi hazırlar ama işletemez çünkü veri tabanı meşguldür. Ve böylece görev planlayıcısı (bloke olan) yüksek öncelikli iş ya da yüksek öncelikliyi bloke etmekte olan düşük öncelikli iş yerine bloke edilmemiş çeşitli orta öncelikli işleri yaparak öncelik listesinde aşağıya doğru iner. Kâbusa benzer bu senaryolarda sistemin en yüksek öncelikleri uzun süreler boyunca göz ardı edilebilir.*

JPL mühendisleri Pathfinder probleminin bir önceliklendirme sırasının tersine dönüşü olduğunu belirledikten sonra bir düzeltme kodu yazdılar ve yeni kodu milyonlarca kilometre uzaktan araca gönderdiler. Güneş sistemi boyunca göndermiş oldukları çözüm neydi? Önceliğin *miras alınması (inheritance)*. Eğer düşük öncelikli bir görevin, yüksek öncelikli bir kaynağı bloke ettiği tespit edilirse o düşük öncelikli iş bir anda sistemdeki en yüksek öncelikli şey hâline gelir ve bloke ettiği işin önceliğini “*miras alır*”.

Komedyen Mitch Hedberg bir keresinde yaşadığı bir olayı şu şekilde anlatmaktadır: “Bir kumarhanede oyun oynarken bir adam geldi ve ‘Buradan kalkmanız gerekli çünkü yangın çıkışını kapatıyorsunuz’ dedi. Sanki yangın çıksa ben kaçmayacağımışım gibi”. Gelen kişinin sıkıntısı öncelik sırasının tersine dönmesi, Hedberg’in karşı tarafın tezini çürütmesi ise önceliğin miras alınmasıydı. “Eğer bir yanıcı maddeyseniz ve ayaklarınız varsa, asla bir yangın çıkışının önünü kapatmazsınız.”

Buradaki ahlaki bakış açısı; ne bir şeyleri halletme sevgisinin, ne de *önemli* şeyleri halletme sevgisinin çizelgeleme ve planla-

* İronik bir şekilde Pathfinder yazılım ekip lideri Glenn Reeves, “zaman baskıları” konusundaki bugları ve bunların geliştirme aşamasında düzeltilmesi hususunun “düşük öncelikli” olmasını suçlayacaktı. Bu nedenle altta yatan neden bir bakıma problemin kendisini yansıtmaktaydı.

ma konusundaki görünmez tehlikelerden kaçınmak için yeterli olduğudur. Yapabildiğiniz en önemli şeyi titiz bir şekilde halletme konusundaki bağlılık, tüm dünya tarafından geciktirme ve erteleme gibi görünecek bir şeye neden olabilir. Kısa sürede ilerleme kaydetmek isteyen bir kişinin yerinde sayması, tıpkı patinaj çeken bir arabanın durumuna benzemektedir. Goethe, “En önemli şeyler asla önemsiz şeylerin insafına kalmamalıdır” demiştir ama bu görüşü tam olarak doğru değildir. Bazen en önemli olan şey, en az önemli olan şey tamamlanmadan yapılamaz. Bu nedenle o en önemsiz şeye önem vermekten başka bir seçenek bulunmamaktadır.

Belirli bir göreve bir diğeri bitmeden başlanamadığında bu duruma çizelgeleme teorisyenleri “öncüllük kısıtları” adını vermektedir. Yöneylem araştırması uzmanı Laura Albert McLay için bu prensip, evinin işlerini idarede birden fazla kez farklı şekilde işine yaramıştır. “Eğer bu şeyleri görebilirseniz gerçekten çok faydalı oluyorlar. Üç çocukla gün geçirmek elbette ki oldukça iyi bir çizelgelemeyle olmaktadır... Çocuklar kahvaltılarını yapmadan evden çıkamayız ve ben onlara birer tane kaşık vermezsem kahvaltılarını yapamazlar. Bazen her şeyi geciktiren şey çok basit bir şey olmaktadır. Çizelgeleme algoritmaları açısından bu ufak ve basit şeyin sadece ne olduğunu bilmek ve bunu işler şekilde sürdürmek inanılmaz derecede faydalı olmaktadır. Ben her gün günlük işlerimi bu şekilde yürütmekteyim.”

Çizelgeleme konusunda bir araştırmacı olan Jan Karel Lenstra 1978’de aynı prensibi arkadaşı Gene’in Berkeley’de yeni bir eve taşınmasına yardımcı olurken kullanmayı başardı. “Gene, acil olan bir şeye başlamadan önce yapılmak zorunda olan bir şeyi ertelemekteydi.” Lenstra’nın hatırladığına göre arabayı sahibine geri götürmeleri ve dairedeki bir şeyi onarmak için gerekli olan bir aleti de bu araçla apartmana götürmeleri gerekmekteydi.

Apartmandaki onarım acil değildi (ve bu nedenle de geciktirilmekteydi) ama aracın geri verilmesi hususu acildi. Lenstra “tamir işinin daha acil olarak değerlendirilmesi gerektiğini” söylediğini belirtmiştir. Lenstra çizelgeleme teorisinde önemli bir figür olmasına ve arkadaşına tavsiye verecek bir konumda olmasına karşın konuda bir ironi mevcuttu. Bu olay, öncüllük kısıtları nedeniyle önceliklerin tersine dönmesi durumunun ders kitaplarında yer alabilecek bir örneğiydi. Ve tabi ki öncüllük kısıtları üzerine tartışmasız en büyük uzmanı da arkadaşı Eugene “Gene” Lawler’dan başkası değildi.

Hız Tümseği

Bir dizi görevi ve işi en verimli şekilde tamamlamak için sıralama üzerine hayatının çoğunu harcamış olduğu göz önüne alındığında Lawler, kariyerinde oldukça dolambaçlı bir yolda seyahat etmiştir. 1954 senesinde Harvard’da lisansüstü eğitimine (doktorasını bitirmeden ayrılacaktı) başlamadan önce Florida Eyalet Üniversitesi’nde matematik bölümünü bitirmişti. Hukuk fakültesinde, orduda ve (oldukça tematik bir şekilde) bir makine atölyesinde bir süre geçirdikten sonra 1958 senesinde Harvard’a döndü, doktorasını bitirdi ve Michigan Üniversitesi’nde işe girdi. Tatili sırasında 1969’daki Berkeley ziyaretinde Vietnam Savaşı protestoları nedeniyle tutuklandı. Ertesi sene Berkeley’in akademik kadrosuna katıldı ve bilgisayar bilimi bölümünün “sosyal bilinci” olarak bir ün kazandı. 1994’teki ölümünden sonra bilgisayar biliminin insani açıdan potansiyelini ortaya koyan kişilere verilmek üzere adına bir ödül verilmeye başlandı.

Lawler’ın öncüllük kısıtları konusundaki ilk araştırmasında bu problemin üstesinden kolay bir şekilde gelinebileceği öngörülmüştü. Örneğin, bir grup işin gecikmelerinin toplamını minimize eden En Erken Teslim Tarihi algoritmasını ele alalım. Eğer

işlerinizi daha karmaşıklaştıran görevlerinizin öncüllük kısıtları varsa bazı işlerin yapılması için diğerlerinin tamamlanması gereken bu görevleri sadece teslim tarihine göre sıralayamazsınız. Fakat Lawler 1968’de, çizelgeyi sondan başa doğru yaparsanız bir sıkıntı olmayacağını kanıtlamıştır. Sadece başka görevlere bağlı olmayan görevlere bakın ve en son teslim edilmesi gerekeni en sona yerleştirin. Daha sonra sadece bu süreci tekrarlayın ve ön şart olarak diğer görevlerin bağlı olmadığı (ve henüz planlanmamış olan) görevleri değerlendirerek devam edin.

Lawler öncüllük kısıtları konusunda daha derinlemesine çalıştıkça ilgi çekici bir şey buldu. En Kısa İşlem Süresi Algoritması, daha önce de gördüğümüz gibi yapılacaklar listenizden süratli bir biçimde en fazla sayıda iş kalemini çıkarmak istiyorsanız en optimal algoritmadır. Fakat elinizdeki işlerin öncüllük kısıtları varsa En Kısa İşlem Süresi Algoritmasını buna uyacak şekilde değiştirmek basit değildir. Basit bir çizelgeleme problemi gibi görünmesine karşın ne Lawler ne de bir başka araştırmacı bunu çözmek için verimli bir metot bulmuştur.

Hatta durum bundan da kötüdür. Lawler çok geçmeden bu problemin bilgisayar mühendislerinin herhangi verimli bir çözümünün olmadığına inandıkları bir problem sınıfına ait olduğunu keşfedecekti. Bu alana “çözülemez (intractable)”* denilmekteydi. Çizelgeleme teorisinin ilk hız tümseğinin bir taş duvar olduğu ortaya çıktı.

Tıpkı akıllıca bir çözümün tam olarak kesin bir şekilde mevcut olmadığı “üç katı ya da hiç” senaryosunda da görmüş olduğumuz gibi, ortaya konan her problemin bir cevabı bulunmamaktadır. Çizelgeleme problemlerinde her görev ve kısıt setinin *bazı* mükemmel bir çizelge ya da çizelgeleri mevcuttur ve bu

* Bu problemleri daha detaylı olarak 8’inci bölümde ele alacağız.

problemler *tanım olarak* cevapsız değildir ama makul bir zaman içinde optimal çizelgeyi bulacak bir algoritmanın olmadığı durumlar da olabilir.

Bu durum Lawler ve Lenstra gibi araştırmacıları karşı konulmaz bir soruya yönlendirmiştir. O zaman çizelgeleme problemlerinin ne kadarlık bir kısmı çözülemez? Selmer Johnson'ın kitap ciltleme makalesiyle çizelgeleme teorisinin başlamasından 20 sene sonra bireysel çözüm sunan araştırmalar çok daha büyük ve zorlu bir hâl alıyordu. Çizelgeleme teorisinin tam bir haritasını ortaya koymak için bir maceraya atılmışlardı.

Araştırmacıların bulduğu şey, bir çizelgeleme problemindeki en ufak değişikliğin bile problemi çözülebilir ve çözülemez arasındaki ince ve düzensiz çizginin diğer tarafına itebildiği olmuştur. Örneğin Moore Algoritması gecikmiş iş kalemlerinin sayısını (ya da bozulan meyvelerin sayısını) hepsi aynı değerde olduğu zaman minimize eder ancak eğer bazıları diğerlerinden daha önemli ise problem çözülemez hâle gelir ve hiçbir algoritma optimal çizelgeyi sunamaz. Benzer şekilde bazı işlere başlamak için belirli bir süre beklemek, elimizde verimli sayılabilecek çözümleri olan neredeyse tüm çizelgeleme problemlerini çözülemez hâle getirir. Çöplerin toplanacağı günden önceki geceye kadar çöpleri kapının önüne çıkaramamak mantıklı bir belediye uygulama kuralı olabilir lakin sizin takviminizi çözümsüzlüğe itebilir.

Çizelgeleme teorisinin sınırlarını belirleme işlemi bugün bile devam etmektedir. Son zamanlarda yapılan bir araştırma tüm problemlerin yüzde yedisinin durumunun hâlen bilinmediğini, yani çizelgeleme alanının keşfedilmemiş bölgeleri olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bildiğimiz yüzde 93'lük kısım ile ilgili tüm haberler de iyi değildir. Bunların sadece yüzde dokuzu verimli bir şekilde çözülebilmektedir ve kalan yüzde 84'lük kısmın

çözülemez olduğu kanıtlanmıştır*. Diğer bir deyişle, birçok çizelgeleme probleminin hazır bir çözümü bulunmamaktadır. Eğer takviminizi kusursuz bir şekilde yönetmek size çok ağır geliyorsa bunun nedeni belki de gerçekten öyle olduğu içindir. Yine de şu ana kadar bahsetmiş olduğumuz algoritmalar genellikle bu zor problemleri çözmek için kusursuz olmasalar da en azından beklentileri karşılayacak kadar iyi başlangıç noktalarıdır.

Her şeyi bir kenara bırakın: Ön Almak ve Belirsizlik

Bir ağacı dikmek için en iyi zaman 20 yıl öncesiydi. Ondan sonraki en iyi zaman ise şimdidir.

—Atasözü

Şu ana kadar sadece çizelgeleme işlemlerini zorlaştıran faktörleri inceledik. Fakat bunu kolaylaştırabilen bir dokunuş vardır: Bir iş kalemini süreç sırasında durdurup diğerine geçebilme imkânı. Ön almak (preemption), oyunu önemli şekilde değiştirebilecek bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır.

En büyük gecikmeyi (bir kahve dükkânındaki müşterilere hizmet sunmak) ya da tamamlanma zamanlarını (hızlı bir şekilde yapılacak işler listenizi kısaltmak) minimize etmenin her ikisi de, eğer bazı görevlere belirli bir zamana kadar başlanamazsa çözümsüzlüğe neden olabilir. Ancak ön almaya izin verildiğinde verimli sonuçlar üretilir. Her iki durumda da klasik stratejiler -En Erken Teslim Tarihi ve En Kısa İşlem Süresi- oldukça basit değişikliklerle en iyi yaklaşımlar olarak kalmaktadır. Bir iş kaleminin başlama zamanı geldiğinde bu iş kalemini o anda yapılmakta olanla karşılaştıran bir strateji olarak karşımıza çıkmakta-

* İşler bu rakamların gösterdiği kadar kötü değildir çünkü birden fazla makineyi içermektedir. Bu iş, takviminizi yönetmekten daha çok bir grup çalışmanı yönetmek gibidir.

dır. Eğer En Erken Teslim Tarihi ile çalışıyorsanız ve yeni iş kalemi mevcut olandan daha yakın bir zamanda ise işleri değiştirin, aksi hâlde ise aynı şekilde devam edin. Benzer şekilde eğer En Kısa İşlem Süresi ile çalışıyorsanız ve yeni iş kalemi mevcut olandan daha hızlı bir şekilde tamamlanabiliyorsa önce yeni olanı tamamlamak için durun, yoksa yapmakta olduğunuza devam edin.

Normalde iyi bir hafta geçiren bir makine atölyesinde gelecek birkaç gün her şey beklendiği şekilde geçebilir lakin çoğumuz körebe oynamaktayız. Örneğin, belirli bir projeye ne zaman başlayabileceğimizden emin olamayabiliriz. Ve her an telefonumuz çalıp ya da e-posta adresimize yeni bir ileti gelip planımıza tamamen yeni bir görev eklenebilir. Görevlerin ne zaman başlayacağını bilmeseniz bile En Erken Teslim Tarihi ve En Kısa İşlem Süresi algoritmalarının hâlen optimal stratejiler oldukları ve size belirsizlik karşısında ortalama olarak mevcut en iyi performansı garanti edebildikleri ortaya çıkmaktadır. Eğer işler beklenmedik anlarda önünüze geliyorsa, maksimum gecikmeyi minimize etmek için optimal strateji hâlen En Erken Teslim Tarihi'nin ön alma versiyonudur. Eğer yeni gelen işin teslim zamanı mevcut yapılmakta olandan daha erkense yeni gelene geçecek, aksi durumda yeni geleni sonraya bırakacaksınız. Benzer şekilde En Kısa İşlem Süresinin ön alma versiyonu (mevcut işin kalan tamamlanma süresiyle yeni geleni tamamlamak için gereken zamanı karşılaştırmak) toplam tamamlanma sürelerinin minimize edilmesi için hâlen optimal stratejidir.

Aslında En Kısa İşlem Süresinin ağırlıklandırılmış versiyonu, belirsizlik karşısındaki genel maksatlı en iyi çizelgeleme stratejisi olmak için oldukça iyi bir adaydır. Zaman yönetimi açısından basit bir talimat vermektedir; yeni iş geldiğinde, bunun önem derecesini tamamlanması için gerekli zamana bölün. Eğer sonuç

mevcut yapmakta olduğunuz işin sonucundan büyükse yeni işi yapmaya başlayın, aksi takdirde mevcut işi yapmaya devam edin. Bu algoritma, çizelgeleme teorisinin sahip olmak zorunda olduğu bir İsviçre Çakısı veya maymuncuktur. Ve sadece çizelgeleme probleminin bir türü için değil, birçok türü için optimal stratejidir. Belirli varsayımlar altında sadece (beklendiği şekilde) ağırlıklı tamamlanma sürelerini değil, aynı zamanda geciken işlerin ağırlıklarını ve bu işlerin ağırlıklı gecikme süre toplamalarını minimize eder.

İlginç bir şekilde tüm bu ölçütleri optimize etmek, eğer başlangıç zamanlarını ve işlerin sürelerini önceden biliyorsak çok çok zordur. Bu nedenle çizelgelemede belirsizliğin etkisini göz önüne almak karşı bir bakış açısını gözler önüne sermektedir. Durugörüde bulunmanın bir zorunluluk olduğu durumlar mevcuttur. Önceden tam bir bilgiye sahip olsak bile, kusursuz çizelgeyi bulmak uygulama açısından imkânsız olabilir. Buna karşın, hazır bir şekilde beklemek ve işler geldikçe bunlara cevap vermek size kusursuz bir çizelge vermeyecektir lakin yapabileceğinizin en iyisi hesaplamaktan çok daha kolaydır. Bu bir teselli gibidir. Jason Fried, işletme alanında yazar ve kodlamacı olarak şöyle demektedir: “Elinizde kusursuz bir plan olmadan ilerleyemeyeceğinizi mi düşünüyorsunuz? ‘Plan’ kelimesi yerine ‘tahmin’ kelimesini kullanın ve rahat olun.” Çizelgeleme teorisi bunun doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Gelecek belirsiz olduğunda ihtiyacınız olanın bir takvim değil, sadece bir yapılacaklar listesi olduğu ortaya çıkmaktadır.

Ön Almak Bedava Değildir:

İçerik Değiştirme (Context Switching)

Ne kadar aceleyle gidersem / o kadar geride kalıyorum.

—Boonville, California’daki bir nakıştan

Programlamacılar konuşmazlar çünkü sözlerinin kesilmesi gerekir... Diğer insanlarla uyum içerisinde olmak sadece bir düşünce trenini durdurmak anlamına gelebilir. Durdurmak hata anlamına gelir. Trenden inmemelisiniz.

—Ellen ULLMAN

Çizelgeleme teorisi sonuçta bizlere oldukça teşvik edici bir hikâye anlatmaktadır. Birçok çizelgeleme problemini çözmek için basit ve optimal algoritmalar mevcuttur ve bu problemler günlük yaşantılarımızda karşılaştığımız durumlara oldukça yakındır. Ancak iş gerçek dünyada sadece bir makineyi planlamak olduğunda işler karışmaktadır.

İlk olarak insanlar ve bilgisayar işletim sistemleri benzer şekilde ilgi çekici bir zorlukla karşılaşır. Çizelgeleme işini yapan ve kendi işlevi çizelgelenen makine aslında tek ve aynı makinedir. Yapılacaklar listesindeki bir iş kalemini düzeltme işlemi, onun önceliklendirilmesini ve çizelgelenmesini gerektirir.

İkinci olarak ön alma bedava değildir. İşleri değiştirdiğiniz her sefer, bir bedel ödersiniz ve bu durum bilgisayar biliminde *içerik değişikliği* olarak bilinir. Bir bilgisayar yaptığı bir işi değiştirirse, her zaman belirli bir ek yük olur. Yarıda kestiği işin tam olarak yerini belirler ve bu programla ilgili tüm bilgileri bir kenara koyar. Daha sonra, hangi programı bir sonraki sırada işleteceğini belirlemesi gerekir. En son olarak da o program için tüm ilgili bilgiyi çekmeli, koddaki yerini bulmalı ve işe koyulmalıdır.

Bu değişimin ve geri dönüşün hiçbirisi “gerçek bir iş” değildir. Yani, bunların hiçbirisi bilgisayarın aralarında geçiş yaptığı işler açısından bir ilerleme değildir. Bu bir meta iştir (meta-work). Her bir değişim, boşa harcanan zaman demektir.

İnsanlar açısından da bu içerik değişikliğinin bir maliyeti bulunmaktadır. Biz bu durumun farkına, masamızdaki kâğıtları kaldırıp geri koyduğumuzda, bilgisayarda dosyalar açıp kapadığımızda, bir odaya neden gittiğimizi hatırlayamadığımızda ya da yüksek sesle “Nerede kalmıştım” ya da “Ne diyordum?” dediğimizde varırız. Psikologlar bizler için bu değişikliklerin etkilerinin hem gecikme hem de hatalar içerebildiğini (mikro saniyeler değil dakikalar cinsinden) göstermişlerdir. Bunu bir örnekle açıklamak gerekirse, çalışmanızı bir saat içerisinde birkaç kez kesintiye uğratan kişi, aslında hiç iş yapmamanıza neden olabilir.

Bizler kişisel olarak hem programlamanın hem de kodlamanın, tüm sistemin durumunun zihinde tutulmasını gerektirdiğini ve bunun da aşırı derecede içerik değişikliği maliyeti taşıdığını tespit ettik. Yazılım programları üzerine çalışan bir arkadaşımız normal bir iş haftasının kendi iş akışı için çok uygun olmadığını, bu nedenle on altı saatlik iş günlerinin onun için sekiz saatlik iş günlerinden iki kattan daha fazla üretkenlik anlamına geldiğini söylemiştir. Brian kendi adına yazarlığın, metale şekil vermeden önce belirli bir süre ısıtılmasının gerektiği nalbantlığa benzediğini düşünmektedir. Doksan dakikalık bir yazma eylemi tamamlanmadan önce işinin kesilmesi durumunu faydasız olarak adlandırmaktadır çünkü ona göre ilk yarım saatte “Şimdi, nerede kalmıştım?” sözünden başka bir şey olmamaktadır. Pittsburgh Üniversitesi’nden çizelgeleme konusunda uzman Kirk Pruhs da benzer bir tecrübeye sahiptir. “Eğer çalışabileceğim süre bir saatten az ise sadece hataları düzeltirim çünkü gerçekten ne yapmak istediğime karar vermek ilk 35 dakikamı almaktadır ve sonrasında zaman az ise bunu yapacak zamanım bile olmayabilmektedir.”

Rudyard Kipling'in meşhur 1910 şiiri "Eğer" zaman yönetimi için coşkulu bir çağrıyla sona ermektedir: "Eğer affı olmayan şu anı / Dünyanın 60 saniyelik koşuşturmacasıyla doldurabilirseniz..."

Eğer... Gerçek şu ki, her zaman ilave bir yük vardır. Boş iş ve işlerin yönetimi ile muhasebe konularında kaybedilen zaman her zaman var olacaktır. Bu, çizelgelemenin karşılıklı fedakârlık edilen temel konularından biridir. Ve ne kadar fazla iş alırsanız, o kadar ilave yük olacaktır. Ve bu durum, kâbuslara konu olacak şekilde etkinlik kaybı (thrashing) denilen bir fenomene dönüşmektedir.

Etkinlik Kaybı (Thrashing)

Gage: Mr. Zuckerberg, tüm ilginizi bana verebilir misiniz?...

Zuckerberg: İlginin bir kısmı, minimum miktarı sizindir.

—*Sosyal Ağ (The Social Network)* filminden

Bilgisayarlar "iş parçacığı uygulaması (threading)" denilen bir süreç sayesinde birçok görevi aynı anda yürütebilirler. Bunu, üç topu birlikte havada tutmak olarak düşünebilirsiniz. Tıpkı bir cambazın her seferinde sadece bir topu havaya atması ve üçünü de aynı anda havada tutması gibi bir CPU'da her seferinde sadece bir program üzerinde çalışır fakat görevler arasında yeteri kadar süratle (saniyenin on binde biri kadarlık bir sürede) geçiş yaparak aynı anda bir filmi oynatabilir, internette gezinebilir ve gelen bir e-postayı size gösterebilir.

Bilgisayar mühendisleri 1960'larda bilgisayarların kaynaklarını farklı görevler ve kullanıcılar arasında paylaştırma sürecini nasıl otomasyona aktarabilecekleri konusunda düşünmeye başladılar. Bilgisayarlardaki çoklu görevler konusunda bir uzman olan

Peter Denning, MIT’de doktora öğrenimi gördüğü o zamanları heyecanlı günler olarak hatırlamaktadır. Heyecanlı ve belirsiz. “Bir ana hafızayı, bazıları büyümeye, bazıları küçülmeye, bazıları da diğer her şeyle etkileşime girmeye çalışırken hafıza çalışmaya çalışan birçok görev arasında nasıl bölümlersiniz?... Tüm bu etkileşimleri nasıl yönetirsiniz? Hiç kimse bunun hakkında bir şey bilmiyordu.”

Araştırmacıların henüz ne yaptıkları konusunda gerçekten bir şey bilmedikleri göz önüne alındığında bu çabaları şaşırtıcı olmayan bir şekilde güçlüklerle karşılaştı. Bunlardan da özellikle bir tanesi dikkatlerini çekti. Denning’in de açıkladığı gibi, “çoklu program işleyişine siz daha fazla iş eklediğinizde dramatik bir problem ortaya çıkar. Kritik eşiği geçtiğiniz bir noktaya gelirsiniz. Bunun nerede olduğunu önceden bilemezsiniz ve ancak oraya ulaştığınızda varlığını anlarsınız; birden tüm sistem çöker.”

Top cambazına ilişkin görüntüyü yeniden gözünüzün önüne getirin. Bir top havadayken cambazın yeni bir topu havaya fırlatması için yeteri kadar zamanı vardır. Peki, ya cambaz idare edebileceğinden fazla bir topu daha eline alırsa? Sadece o topu düşürmez, *hepsini* düşürür. Tüm sistem, kelimenin tam anlamıyla çöker. Denning bununla ilgili “İlave bir programın varlığı hizmetin tamamen çökmesine neden oldu... Bu iki durum arasındaki keskin fark ilk başta akılları zorlamaktadır ve yoğun ana hafızaya yeni programlar eklendikçe giderek artan bir kötüye gidişi beklememize neden olabilir” demektedir. Aslında tam bir felaket. Bir top cambazının yetersiz kaldığı anı anlayabilmemize karşın bir *makineye* bunun olmasına ne neden olabilir?

Çizelgeleme teorisinin yolu işte bu noktada önbellek teorisiiyle kesişmektedir. Önbellek teorisinin ardında yatan fikir, “çalışılan” işlerin hızlıca erişilecek şekilde hazır tutulmasıdır.

Bunu yapmanın bir yolu, gerekli olduğu anda bilgisayarın kullanacağı bilgiyi yavaş sabit disk yerine hızlı hafızada bulundurmaktır. Fakat bir görev hepsinin sığmayacağı birçok şeyin takibini bu hafıza üzerinden yaparsa, gerçek işi yapmaktan daha fazla zamanı bilgileri bu hafızaya almaya ve çıkarmaya harcarsınız. Dahası, görevler arasında geçiş yaptığınızda yeni aktif hâle gelen görev, çalışan *başka* görevlerin bazı kısımlarını hafızadan çıkararak yer açabilir. Aktif hâle geldikten sonraki görevde kendi çalışma setini sabit diskten alarak hafıza bölümüne alacak ve diğerlerini buradan dışarı itecektir. Bu sorun -görevlerin birbirlerinden yer çalması- işlemci ve hafıza arasında önbellek hiyerarşileri olan sistemlerde daha da kötü bir hâl alabilir. Linux işletim sistemi planlayıcısını geliştiren ekibin başında yer alan Peter Zijlstra bunu, “Önbellekler mevcut iş yükleri için sıcaktırlar ve siz içeriği değiştirdiğinizde neredeyse tüm önbellekleri geçersiz kılırsınız. Ve bu zarar verir” şeklinde belirtmektedir. En sonunda, bir program başka programa yer vermeden önce gerekli tüm şeyleri hafızaya alacak *kadar* uzun çalışabilir.

Bu Thrashing'dir: Son sürat çalışan ve hiçbir şey tamamlamayan bir sistem. Denning bu olguyu ilk olarak hafıza yönetimi konusunda tespit etmişti ama bilgisayar mühendisleri şimdilerde sistemin meta işlerle tamamen dolu olduğu için durma noktasına geldiği hemen hemen her duruma “Thrashing” demektedirler. Thrashing bir bilgisayarın performansı yavaş yavaş durmaz. Bir uçurumdan aşağı atlar gibi olur. “Gerçek iş” tam olarak sıfıra inmiştir ve bu, neredeyse içinden çıkılamayacak bir durum demektir.

Thrashing insanların da karşılaştığı bir durumdur. Eğer yapmanız gereken her şeyi bir kâğıda yazmak için yapmakta olduğunuz şeyleri bir anlığına durdurmak istediğiniz bir an yaşıyorsanız fakat buna bile zaman ayıramadıysanız, Thrashing'i yaşı-

mişsinizdir. Ve bunun nedeni bilgisayarlarda olanın aynısıdır. Her bir görev, bizim sınırlı algı kaynağımızdan gelmektedir. Sadece yapmamız gerekenleri hatırlamak bile tüm dikkatimizi alıyorken ya da tüm işleri önceliklendirmek onları yapacağımız zamanın hepsini tüketiyorken veya zihnimizdeki düşünce trenimiz bu düşüncelerin eyleme dönüşmesi sırasında sürekli olarak durduruluyorsa bu durum panik durumudur ya da hiper aktiviteden kaynaklı bir felç gibidir. Bu durum Thrashing'dir ve bilgisayarlar bunu oldukça iyi bilmektedir.

Eğer Thrashing durumundaki bir bilgisayarla boğuşmak zorunda kaldıysanız, bilgisayar biliminin bu durumdan nasıl kurtulduğu konusu ilginizi çekebilir. Denning, 1960'larda konu üzerine yazdığı önemli makalesinde; 25 gramlık bir önlemenin yarım kiloluk bir çareye denk geldiğine dikkat çekmektedir. Yapılacak en kolay şey sadece daha fazla hafızaya sahip olmaktır. Örneğin, tüm çalışan programların setlerini bir kerede hafızaya almak ve programlar arasında geçiş için gerekli zamanı azaltmak için yeteri kadar RAM bu konuyu bitirebilir. Fakat Thrashing için önleyici tavsiyeler kendinizi böyle bir durumun ortasında bulduğunuzda size yardımcı olmaz.

Thrashing'den korunmanın diğer yolu da hayır deme sanatını öğrenmektir. Örneğin Denning, bir sistemin elindeki çalışan setleri sürdürmek için yeterli boş hafızası yoksa, yeni bir programı eklemeyi reddetmesi gerektiğini savunmuştur. Bu durum hem makineler için, hem de kapasitesini tamamen doldurmuş kişilerde Thrashing durumunu önler. Ancak bu durum, hâlihazırda kendisini aşırı iş yükü altında bulan bizler için ulaşılamaz bir lükstür.

Bu durumlarda çalışmanın bir yolu, daha *aptalca* çalışmaktır. İşler arasında geçiş yapmaktaki meta iş kaynaklarının en büyüklerinden bir tanesi, hafızayla ilişkili konuların yanı sıra bir sonra-

ki adımda ne yapılacağını seçme eylemidir. Bu eylem, bazen iş gerçekten yapmanın yerini alabilir. Diyelim ki n kadar mesajla dolup taşmış bir durumla karşı karşıyasınız ve sıralama teorisinden biliyoruz ki en önemlisine cevap vermek için bunları sürekli olarak taramak $O(n^2)$ işlem gerektirecektir; n mesajı n kez gözden geçirme. Bu durum, sabah uyandığınızda normalin üç katı dolu bir posta kutusuyla karşılaşmanızda bu posta kutusunda işlem yapmanızın normalden dokuz kat uzun süreceği anlamına gelir. Dahası, bu e-postalar arasında gezinmek herhangi birine cevap vermeden önce her iletiyi tek tek zihninize almanız anlamına gelir. İşte size hafıza Thrashing'i için şaşmaz bir reçete.

Bir Thrashing durumunda aslında hiçbir ilerleme kaydetmezsiniz. Bu nedenle görevleri yanlış bir sırayla yapmak bile, hiçbir şey yapmamaktan daha iyidir. En önemli e-postalara önce cevap vermek yerine -bu eylem işin kendisinin yapılmasından daha uzun bir süre alacak olan bir değerlendirme gerektirmektedir- belki de bu kuadratik bataklığın yanından geçip sadece rastgele bir sırayla gelen e-postalara cevap vermelisiniz. Aynı şekilde düşünen Linux çekirdek ekibi yıllar önce, planlayıcılarını süreç önceliklerini hesaplama daha az “akıllı” olan ve bunu yaparken daha az zaman harcayan planlayıcılarla değiştirdi.

Eğer yine de önceliklerinizi korumak istiyorsanız, üretkenliğinizi geri kazanmanın farklı ve daha ilginç bir takasa dayanan yolu vardır.

Duraklamaları Birleştirme (Interrupt Coalescing)

Gerçek zamanlı çizelgelemeyi bu kadar karmaşık ve ilginç kılan şeyin bir kısmı aslında tam olarak birbiriyle uyumlu olmayan iki prensip arasındaki pazarlıktır. Bu iki prensibe *cevap verme* (*responsiveness*) ve *iş üretimi* (*throughput*) denilir. Bu iki prensip, bir şeye ne kadar hızlı tepki verebildiğiniz ve toplamda ne

kadar çok şey yapabildiğiniz anlamına gelir. Bir ofis ortamında çalışmış olan herhangi biri bu iki ölçüt arasındaki etkileşimi anlayabilir. İşi telefonlara cevap vermek olan kişilerin var olma sebebinin bir kısmı işte budur. Diğerleri iş üretebilsin diye onlar cevap verir.

Bu ikisi arasında karşılıklı ödünleşim arasında kaldığınızda yaşam oldukça zordur. Ve belki de işleri yürütmenin en iyi yolu, mantığa ters bir şekilde de olsa yavaşılmaktır.

İşletim sistemi planlayıcıları genel olarak her programın en azından bir süre çalışmasının garanti olduğu, sistemin sürecin (process) her “dilimini” bir programa tahsis ettiği bir periyot tanımlar. Ne kadar çok program çalışıyorsa bu dilimler o kadar küçük hâle gelir ve her periyotta -iş üretimi pahasına cevap vermeyi koruyarak- o kadar çok görevler arası geçiş olur. Ancak eğer her bir sürece en azından *biraz* ilgi garanti eden bu politika kontrol edilmeden bırakılırsa bir felakete neden olabilir. Yeteri kadar program çalıştığında bir göreve düşen dilim, sistemin tüm dilimi diğer göreve geçme işlemine başlamadan önce bu görev değişikliğine harcadığı noktaya kadar küçülecektir.

Buradaki suçlu, sıkı bir şekilde sağlanan cevap verme garantisidir. Bu nedenle modern işletim sistemleri dilimleri için birer minimum uzunluk belirlemektedir ve periyodu daha da ince bir şekilde bölümlere ayırmayı reddetmektedir. (Örneğin Linux’ta bu minimum faydalı dilim bir milisaniyenin dörtte üçüdür. İnsanlarda bunun gerçekçi bir bakış açısıyla en azından birkaç dakika olması gerekmektedir.) Eğer bu noktadan sonra daha fazla süreç eklenirse, periyot sadece daha uzun sürecektir. Bu da süreçlerin sıra beklemesini gerektireceği ve sırası gelen sürecin sahip olacağı sürenin bir şeyler yapmak için yeterli olacağı anlamına gelir.

Herhangi bir görev üzerinde minimum bir zaman belirlemek,

üretileen işleri tamamen yok etmek uğruna cevap vermeye bağlanmaya karşı koruma sağlar. Eğer minimum dilim görevler arası geçişten daha uzunsa, o zaman sistem yaptığı tek işin sadece görevler arası geçiş olduğu bir konuma asla geçmez. Bu, ayrıca insanların yaşamları açısından bir tavsiyeye kolayca dönüştürülebilecek bir prensiptir. Alarmı ayarlayıp çalana kadar sadece tek iş yapmaya odaklandığınız “zaman kutusu (timeboxing)” ya da “Pomodoro Tekniğı (Pomodoros)” gibi yöntemler, bu fikrin günlük yaşamda vücut bulmuş hâlleridir.

Ancak ne kadarlık bir dilim zamanını hedeflemelisiniz? E-postanızı kontrol etmek gibi tekrarlayan bir işi yapma aralıkları arasında ne kadar bekleneceğı sorusuyla karşılaşıldığında iş üretimi açısından cevap oldukça basittir; mümkün olduğu kadar uzun aralıklarla. Ancak iş o kadar basit değildir ve burada da bitmemektedir. Ne kadar yüksek bir iş üretimi oranı varsa, bu aynı zamanda o kadar düşük cevap verme anlamına gelmektedir.

Bilgisayarınızın düzenli bir şekilde kontrol etmek için duraklamak zorunda kaldığı e-postalar değildir; sizsiniz. Bilgisayarınızın faresini dakikalar ya da saatlerce kullanmadıktan sonra hareket ettirdiğinizde fare imlecinin ekranda hızla hareket ettiğini görmeyi beklersiniz ve bu da makinenin sadece sizi kontrol ederken çok fazla iş yaptığı anlamına gelmektedir. Fare ve klavyeyi ne kadar sık kontrol ederse, girdi olduğunda o kadar hızlı bir şekilde cevap verebilir lakin o kadar çok içerik değişikliğı yapmak zorunda kalır. Yani bilgisayar işletim sistemlerinin bazı görevlere kendilerini ne kadar verebileceklerine karar verirken uyduğu kural basittir. Kullanıcıyı yavaşlatmadan ya da gerginlik içine sokmadan mümkün olduğu kadar uzun bir süre göreve devam et.

Küçük bir işi halletmek adına biz insanlar evden çıkıp geri geldiğimizde “gittiğimi fark etmediler bile” diye söyleniriz. Ma-

kinelerimiz bir hesaplama için görevler arası geçiş yaptığında kelimenin tam anlamıyla daha biz görev değişikliğinin farkına bile varmadan geri gelmek zorundadır. Bu denge noktasını bulmak için işletim sistemi programlamacıları psikoloji alanına yönelmiş ve insan beyninin bir gecikmeyi algılaması için geçen milisaniyenin tam sayısını bulmak için psikofizik alanında çalışma yapmışlardır.

Bu çalışmalar sayesinde, işletim sistemleri doğru bir şekilde çalıştığı zaman bilgisayarınızın kendisini ne kadar zorladığını fark etmezsiniz. İşlemciniz tam kapasiteyle çalışırken fare imlecinizi ekranda akıcı bir şekilde gezdirebilmeye devam edersiniz. Akıcılığın size iş üretimi cinsinden bir maliyeti vardır fakat bu, sistem mühendisleri tarafından özellikle yapılan bir tasarım tavidir. Sisteminiz sizinle etkileşime geçmeden mümkün olabildiği kadar fazla zaman harcar ve daha sonra tam zamanında fare imlecini hareket ettirmeye devam eder.

Ve yine bu da insanların yaşamlarına aktarılabilir bir prensiptir. Cevap vermeyi kabul edilebilir minimum sınırın altına düşürmeden mümkün olduğu kadar tek iş üzerinde kalmaya çalışmalısınız. Ne kadar tepkisel olmanız gerektiğine karar verin ve daha sonra eğer işleri halletmek istiyorsanız bundan daha fazla tepkisel olmayın.

Eğer çok fazla farklı türden kısa görevlerle boğuşmanız nedeniyle kendinizi çok fazla görevler arası geçiş yaparken bulursanız, bilgisayar biliminden bir başka fikri de ödünç alıp kullanabilirsiniz: “Duraklamaları Birleştirme”. Eğer ödemeniz gereken beş kredi kartı borcunuz varsa bunları tek tek ödemeyin, beşinci si elinize ulaştığında hepsini birlikte halledin. Faturalarınız elinize geçtiği andan itibaren 30 gün içerisinde gecikmiş duruma düşmediği sürece her ayın örneğin ilk gününü “fatura ödeme günü” olarak belirleyebilir ve o gün masanızdaki tüm faturaları ister üç

saat isterse üç hafta önce gelmiş olsun halledebilirsiniz. Benzer şekilde, eğer e-posta alışverişinde bulunduğunuz kişilerden hiç-biri 24 saatten daha kısa bir süre içinde yanıt vermenize ihtiyaç duymuyorsa e-postalarınızı günde sadece bir kez kontrol edecek şekilde kendinizi sınırlayabilirsiniz. Bilgisayarların kendileri buna benzer bir sistem geliştirirler. Çeşitli alt bileşenlerinden gelen koordine edilmemiş birbirinden ayrı kesintilerle ilgilenmek için görevler arası geçiş yapmaktansa sabit bir zaman aralığı boyunca beklerler ve her şeyi kontrol ederler*.

Bilgisayar mühendisleri ara sıra kendi yaşamlarındaki duraklamaları birleştirme eksikliğinin farkına varırlar. Google yöneticisi Peter Norvig şöyle demektedir: “Bir şeyleri halletmek için bugün üç kez şehir merkezine gitmek zorunda kaldım ve ‘Tamam, bu algoritmandaki sadece bir satırlık bir hata. Her eklendiğinde bunları hemen işleme almak yerine sadece beklemen ya da yapılacaklar sırasına eklemen gerekir’ dedim.”

Günlük yaşamlarımızda, sadece posta sistemlerimizin teslimat döngüsünün bir sonucu olarak hiçbir çaba harcamadan duraklamaları birleştirme faydası sağlarız. Postalarımız günde sadece bir kez dağıtıldığından sadece birkaç dakika geç postalanan bir şeyin size ulaşması 24 saat sonra olacaktır. Görevler arası geçiş yapmanın maliyeti göz önünde bulundurulduğunda burada umut vadeden şey açıkça ortada olmalıdır. Faturalar ve posta açısından günde en fazla bir kez faaliyetleriniz bölünebilir. Dahası, 24 saatlik posta ritmi sizden minimal cevap gerektirir. Bir mektubu aldıktan beş dakika ya da beş saat sonra cevap vermenizin herhangi bir farkı yoktur.

Üniversitelerdeki hocaların odalarında geçirdiği ofis saatleri,

* Bilgisayarların çoğunun bizden bir şeyler istediği her seferinde hata mesajlarını ya da fareyi engelleyen diyalog kutularını karşımıza çıkarmaları göz önüne alındığında, davranışları biraz ikiyüzlüdür. Kullanıcı arayüzü kullanıcının dikkatini bir şekilde CPU’nun nadiren tolere edeceği şekilde talep etmektedir.

öğrencilerden kaynaklanan çalışma kesintilerinin bir araya getirilmesinin bir yoludur. Ve özel sektörde duraklamaları birleştirme, en kötü ofis ritüellerinden biri olan haftalık toplantıların kurtarıcı gibi görünmesini sağlar. Eksileri her ne olursa olsun, düzenli bir şekilde planlanan toplantılar, anlık gelişen çalışma kesintileri ve planlanmamış görevler arası geçişlere karşı en iyi savunmalarımızdan birisidir.

Minimal görevler arası geçiş yaşam stilinin koruyucu meleği belki de efsanevi programlamacı Donald Knuth'tur. "Her seferinde bir şey yaparım. Bilgisayar mühendislerinin toplu işlem dedikleri şey budur. Bunun alternatifi sürekli değiştirmektir. Ben sürekli olarak görev değiştirmem." Knuth şaka yapmıyordu. 1 Ocak 2014'te, TeX yazılımında altı sene boyunca bildirilmiş olan tüm hataları giderdiği "The TeX 2014 İyileştirmesi" çalışmasını başlattı. Raporu mutlu bir imza olan "TeX 2021 İyileştirmeleri için takipte kalın!" ifadesiyle sonlanmaktaydı. Knuth'un benzer şekilde 1990'dan bu yana e-posta adresi yoktur. "E-posta iş hayatında tepede olanlar için harika bir şey. Ancak benim için değil. Benim işim altlarda. Benim yaptığım şey, saatlerce çalışma ve kesintiye uğratılamaz konsantrasyon gerektirir." Tüm postalarını üç ayda bir, gelen fakslarını ise altı ayda bir kontrol etmektedir.

Ancak herkes Knuth'un hayatlarımızdaki duraklamaları birleştirme eylemini bir tasarım prensibi olarak kullanma arzusunu paylaşmak zorunda değildir. Postaneler bu imkânı bize neredeyse şans eseri sunmaktadır. Diğer alanlarda ise bunu ya biz yapmalı ya da talep etmeliyiz. Bipleyn cihazlarımızın gün içerisinde kullanabileceğimiz "Rahatsız Etmeyin" modları vardır. Ancak bu oldukça kaba bir çözümdür. Bunun yerine duraklamaları birleştiren daha esnek bir seçeneği amaçlamalıyız: Cihazların yapmakta olduğu şeyin insanlar için olan bir versiyonu. Beni her on dakikada bir uyar ve bana her şeyi anlat.

Bayes Kuralı

Geleceği Tahmin Etmek

İnsanlığın tüm bilgisi belirsiz, eksik ve kısımdır.

—Bertrand RUSSELL

Güneş yarın yüzünü gösterecek. Güneşin çıkacağına dair cebinde kalan son dolara bahse girebilirsin.

—Annie

J. Richard Gott III, Princeton’da astrofizik alanında doktorasına başlamadan önce 1969 senesinde Avrupa’ya seyahate çıktı. Orada, sekiz sene önce inşa edilmiş olan Berlin Duvarı’nı gördü. Soğuk Savaş’ın katı bir sembolü olan duvarın gölgesinde dururken Doğu ve Batı’yı daha ne kadar ayıracağını düşünmeye başladı.

Bu tahminde absürt bir durum vardır. Jeopolitikayı tahmin etmenin imkânsızlığını bir kenara koysanız bile soru matematiksel açıdan bile komiktir çünkü *tek gözleme dayanan* bir tahmin yapmaya çalışmaktır.

Görünüşte bu kadar saçma olmasına rağmen gereklilikten ötürü her zaman benzer tahminlerde bulunuruz. Örneğin, yabancı bir şehirde bir otobüs durağına gelirsiniz ve orada bekle-

mekte olan diğer turistin yedi dakikadır beklemekte olduğunu öğrenirsiniz. Bir sonraki otobüs ne zaman gelecek? Beklemeye değer mi ve eğer değerse pes etmeden önce ne kadar beklemeniz gerekir?

Arkadaşınız bir aydır biriyle çıkmaktadır ve sizin tavsiyenizi ister. Yaklaşan bir düğüne davet edilmek için çok mu erken? İlişki iyi bir başlangıç yaşamıştır fakat plan yapmak için ne kadar beklenmeli?

Google araştırma müdürü Peter Novig tarafından yapılan meşhur bir sunum “Verinin Akıl Almaz Etkinliği” başlığını taşımış ve “milyarlarca önemsiz gözlemlerin bir bilgiye nasıl neden olduğundan” bahsetmişti. Medya bize sürekli olarak bilgisayarların o milyarlarca veri arasında eşeleme yaptığı ve çıplak gözle görülemeyen hareket kalıplarını bulduğu “büyük veri çağına” yaşadığımızı söylemektedir. Ancak insanların günlük yaşamı ile en ilgili sorunlar diğer uçta yer almaktadır. Günlerimiz “küçük veriler” ile doludur. Aslında tıpkı Berlin Duvarı’nın yanında duran Gott gibi biz de elimizde olabilecek en küçük veri parçasından, tek bir gözlemden bir çıkarım yapmak zorunda kalırız.

Peki bunu nasıl yaparız? Ve nasıl yapmamız gerekir?

Hikâye 18’inci yüzyıl İngiltere’inde zamanın büyük matematik zekâlarının ve rahiplerin bile karşı koyamadığı merak uyandıran bir alanda başlamaktadır: Kumar.

Peder Bayes ile Ters Muhakeme

Eğer bizler, güvenmek için eski tecrübelerle dayalı argümanlara tabi olacaksak ve bunu gelecekle ilgili kararlarımızın standardı hâline getireceksek; bu argümanlar sadece olası olmalıdır.

—David HUME

250 yıldan daha uzun bir süre önce, küçük veriden tahminde bulunma sorusu İngiltere’de çekici bir kaplıca kasabası olan Tunbridge Wells’in papazı Thomas Bayes’in zihnini meşgul etmekteydi. Bayes eğer yeni ve alışık olmadığımız bir çekiliş için 10 bilet alırsak ve bunların beş tanesinin ödül kazandığını düşündüğümüzde o zaman biletlerin kazanma şansını tahmin etmenin nispeten kolay olduğunu düşünüyordu: $5/10$ ya da yüzde 50. Ancak ya tek bilet alırsak ve ödülü kazanırsa ne olacaktı? Kazanma olasılığını gerçekten $1/1$ ya da yüzde 100 olarak görebilir miydik? Bu çok iyimser bir yaklaşım gibi görünmektedir. Öyle mi? Ve eğer öyle ise ne kadar iyimser? Aslında tahminimiz ne olmalıdır?

Bayes’in kendi geçmişi, belirsizlik altında muhakeme konusunda bu kadar etkisi olan biri olduğu düşünülürse ironik bir şekilde belirsizdir. 1701 ya da belki de 1702’de İngiltere kırsalındaki Hertfordshire’da veya belki de Londra’da doğmuştur. Ve de 1746, 1747, 1748 ya da 1749’da tüm matematik alanındaki en etkili çalışmalardan birini kaleme almış, yayınlamadan bırakmış ve diğer şeyleri yapmaya devam etmiştir.

Bu iki olay arasında kesin emin olunan gerçekler mevcuttur. Bir papazın oğlu olan Bayes teoloji çalışmak üzere Edinburgh Üniversitesi’ne gitti ve babası gibi bir papaz olarak atandı. Dini konulardaki meraklarının yanı sıra matematik alanına da ilgisi vardı ve Newton’ın yeni ortaya koymuş olduğu “Calculus” modeline karşı Piskopos George Berkeley tarafından yapılan bir saldırıya karşı 1736’da tutkulu ve heyecanlı bir savunma kaleme aldı. Bu çalışmasının sonucu olarak “geometri, matematik ve felsefe alanında yetenekli bir centilmen” olarak tavsiye edildiği Kraliyet Topluluğu’nun 1742’de bir üyesi oldu.

Bayes 1761 senesinde hayatını kaybettikten sonra, arkadaşı Richard Price’tan onun matematik çalışmalarına göz atması ve yayınlanmaya değer herhangi bir çalışması olup olmadığına bak-

ması istendi. Price kendisini özellikle heyecanlandıran bir çalışmaya rastladı ve bunun hakkında “çalışma çok değerliydi ve ko-runmayı hak ediyordu” dedi. Yazı, tam da bahsetmekte olduğumuz çekiliş türünden bir problemi ele almaktaydı:

Bir piyango çekilişinde hazır bulunan, ama kurguyu ya da kaç adet *boş*, kaç adet *ödül* içerdiğini bilmeyen bir kişi düşünelim. Hatta bu kişinin bu bilgileri çekilen topların içinden çıkan sonuçlara göre kendisinin çıkarmaya çalıştığını varsayalım.

Bayes’in burada sahip olduğu kritik düşünce, kazanan ve kaybeden biletleri genel sonucu anlamak için kullanmaya çalışmanın aslında geriye doğru akıl yürütmek olduğuydu. Ve bunu yapmak için ilk olarak hipotezlerden *ileriye* doğru akıl yürütmemiz gerektiğini ileri sürüyordu. Diğer bir deyişle ilk olarak, eğer çeşitli senaryolar gerçekleşseydi, seçtiğimiz biletleri yine de seçmiş olma olasılığımızın ne olabileceğine karar vermemiz gerektiği-ydi. Modern istatistikçiler tarafından “olasılık” olarak bilinen bu değer bize problemi çözmemiz için ihtiyacımız olan bilgiyi verir.

Örneğin üç bilet aldığımızı ve üçünün de kazandığını varsayalım. Şimdi, eğer bu çekiliş tüm biletlerin kazanan bilet olacağı şekilde özellikle cömert bir şekilde tasarlanmış ise o zaman bizim üçte-üç tecrübemiz elbette ki her seferinde gerçekleşecektir çünkü senaryoya göre şansı yüzde 100’dür. Eğer biletlerin sadece yarısı kazanan ise bizim üçte-üç tecrübemiz sadece $1/2 \times 1/2 \times 1/2$ sefer gerçekleşecektir ya da diğer bir deyişle $1/8$ defa. Ve eğer piyango 1.000 biletten sadece 1 bilete ödül veriyorsa bu defa bizim sonucumuzun gerçekleşmesi inanılmaz derecede zor olur: $1/1.000 \times 1/1.000 \times 1/1.000$ ya da milyarda bir.

Bayes buna göre muhakeme yapmamız gerektiğini ve tüm çekiliş biletlerinin kazanan olma ihtimalinin, tüm biletlerin yarısının kazanan olma ihtimalinden daha olası olduğunu ve ayrıca yarısının kazanan olma ihtimalinin sadece binde bir adedinin kazanan olma ihtimaline göre daha olası olduğunu ileri sürmüştür. Belki de biz bunu daha önceden sezmiş olabiliriz fakat Bayes'in mantığı bize bu sezgiyi rakamlara dökme imkânı sunar. Diğer tüm koşullar eşit olduğunda, tüm biletlerin kazanan olma ihtimalinin, tüm biletlerin yarısının kazanan olma ihtimalinden sekiz kat fazla olduğunu hayal etmemiz gerekir çünkü çektiğimiz biletler tam olarak sekiz kat (yüzde 100'e karşı $1/8$) fazla muhtemel kazanandır. Benzer şekilde biletlerin yarısının kazanan olma ihtimali 1.000'de birinin kazanan olma ihtimalinden 125 milyon kez daha fazladır. Bunu $1/8$ 'i milyarda bir ile karşılaştırdığımız için biliriz.

Bayes'in ileri sürdüğü hususun püf noktası işte burasıdır. Hipotetik geçmişten ileriye doğru akıl yürütmek, daha sonra en olası olana doğru geri mantık yürütmemiz için temel sağlar.

Dâhice ve yenilikçi bir yaklaşımdı ama çekiliş problemine tam bir cevap sunmayı başaramadı. Price Bayes'in sonuçlarını Kraliyet Topluluğu'na sunarken eğer tek bilet alırsanız ve bu bilet kazanırsa, biletlerin en az yarısının kazanma şansının yüzde 75 olduğunu kanıtlayabildi. Ancak olasılıkların olasılıkları hakkında düşünmek biraz baş döndürücü olabilmektedir. Dahası, eğer biri bize "O hâlde çekilişin gerçek olasılığı hakkında ne düşünüyorsun?" şeklinde baskı uygularsa ne diyeceğimizi bilemeyiz.

Bu sorunun -tüm muhtemel hipotezleri tek bir beklenti şeklinde nasıl birleştirirsiniz- cevabı sadece birkaç sene sonra Fransız matematikçi Pierre-Simon Laplace tarafından keşfedilecekti.

Laplace Yasası

Laplace 1749 senesinde Normandiya’da doğdu ve babası onu ruhban sınıfına katılması umuduyla bir Katolik okuluna gönderdi. Laplace Caen Üniversitesi’ne teoloji çalışmak üzere gitti ve tüm yaşamında ruhani ve bilimsel tutkularını dengelemiş olan Bayes’in aksine matematik için okuldan ve ruhban sınıfından tamamen ayrıldı.

Laplace 1774 senesinde, kendisinden önce Bayes’in yapmış olduğu çalışmadan tamamen habersiz bir şekilde “Olayların Nedenlerinin Olasılığı Üzerine Bilimsel bir İnceleme (Treatise on the Probability of the Cause of Events)” isimli önemli bir çalışma yayınladı. Laplace çalışmasında en nihayetinde gözlenen etkilerden muhtemel nedenlere geriye doğru çıkarımda nasıl bulunulacağı problemini çözdü.

Daha önce görmüş olduğumuz gibi Bayes, bir hipotezin diğerine oranla göreceli olasılığını karşılaştırmanın bir yolunu bulmuştu. Fakat bir çekiliş örneğinde, kelimenin tam anlamıyla sonsuz sayıda hipotez mevcuttur. Laplace, Bayes’in savunuculuğunu yaptığı bir zamanların tartışmalı matematiği olan kalkülüsü kullanarak bu geniş olasılık yelpazesinin tek bir beklenen değere, hem de şaşırtıcı bir şekilde öz bir değere indirgenebileceğini kanıtlamayı başardı. Eğer çekiliş hakkında gerçekten önceden hiçbir şey bilmiyorsak, ilk denememizde kazanan bir bilettikten sonra kazanan biletlelerin tüm biletleler içindeki oranının tam olarak $2/3$ olmasını beklememiz gerektiğini göstermiştir. Eğer üç bilett satın alırsak ve hepsi de kazanan çıkarsa, kazanan biletlelerin beklenen oranı tam olarak $4/5$ olur. Aslında, herhangi n denemede w adet kazanan bilett çekme durumunda beklenen değere sadece kazanan deneme sayısına bir eklenip bunun deneme sayısının iki fazlasına bölünmesiyle elde edilen değerdir. Yani, $[(w+1)/(n+2)]$.

Olasılıkları tahmin etmek için inanılmaz derecede basit olan bu yaklaşım **Laplace Yasası** olarak bilinmektedir ve geçmişe dayalı olarak bir olayın olasılığını değerlendirmeniz gereken herhangi bir durumda uygulaması oldukça kolaydır. Eğer bir şey için on deneme yaparsanız ve bunların beşi başarılı olursa Laplace Yasası size genel olarak şansınızın $6/12$ ya da yüzde 50 olacağını söyler. Eğer sadece bir kez dener ve başarılı olursanız, Laplace'ın $2/3$ tahmini hem her seferinde kazanacağınız tahmininden daha akla yatkındır ve aynı zamanda Price'ın görüşünden (bize yüzde 50 ya da daha fazla başarı şansımızın yüzde 75 meta olasılığı olduğunu söyleyen) daha uygulanabilirdir.

Laplace kendi istatistiksel yaklaşımını, aralarında bebeklerin gerçekten eşit bir şekilde erkek ya da kız olarak doğma olasılığına sahip olup olmadığı gibi zamanındaki birçok probleme uyguladı. (Erkek bebeklerin kızlara nazaran çok ufak bir farkla daha fazla olası olduğunu belirli bir kesinlikle gösterdi.) Ayrıca, genel bir kitle için tartışmasız ilk istatistik kitabı olan ve hâlen en iyilerden biri olan *Olasılıklar Üzerine Felsefi Yazı (Philosophical Essay on Probabilities)* adlı eserini kaleme aldı. Bu eserinde teorisini ortaya koydu ve bunun kanun, bilim ve günlük yaşamdaki uygulamalarını değerlendirdi.

Laplace Yasası bize gerçek dünyadaki küçük veriyle karşılaştığımızdaki ilk geçerlilik kuralını sunmaktadır. Sadece birkaç -hatta tek- gözlem de bile bulunsak bize faydalı bir rehberlik sunmaktadır. Otobüsünüzün gecikme olasılığını mı hesaplamak istiyorsunuz? Beyzbol takımınızın kazanma olasılığı mı nedir? Eskiden bunun kaç kere gerçekleştiğini sayın ve bir ekleyin, daha sonra da fırsatların toplam sayısına iki ekleyerek buna bölün. Ve Laplace Yasasının güzelliği ister tek veri isterseniz de milyonlarca veriniz olsun eşit şekilde güzel bir biçimde çalışmasıdır. Küçük Annie'nin yarın güneş doğacağına dair olan inancı kanıtlanmıştır ve bize şunu söyler. Ardı ardına 1,6 trilyon gündür

güneşin doğduğu görüldüğü için bir sonraki “denemede” güneşin yeniden doğma olasılığı yüzde 100’e ayırt edilemeyecek kadar yakındır.

Bayes Kuralı ve Önceki İnancılar

Tüm bu öneriler tutarlı ve anlaşılabilir. Neden daha tutarlı ya da anlaşılabilir olmayan birine öncelik verelim?

—David HUME

Laplace Bayes’in ileri sürdüğü şeylerde, bir başka değişikliği de gözler önüne sermişti: Diğerlerinden *daha olası* olan hipotezlerle nasıl ilgilenmek gerektiği. Örneğin, bir çekilişin katılanların yüzde 99’una ödül verebilmesi mümkün olmasına karşın sadece yüzde 1’lik kesime ödül vermesinin daha olası olduğunu varsayarız. Bu varsayım tahminlerimize yansıtılmalıdır.

Kavramları somutlaştırmak adına, diyelim ki bir arkadaşınız elinde iki bozuk para ile geliyor. Bunlardan biri, yazı ve tura gelme ihtimalleri yüzde 50-yüzde 50 olan “adil” bir bozuk para, diğeri ise her iki tarafı da tura olan bir para. Bunları bir torbaya atıyor ve daha sonra rastgele birini seçiyor. Havaya atıyor ve sonuç tura geliyor. Arkadaşınızın hangi parayı attığını düşünürsünüz?

Bayes’in geriye doğru çalışma şekli bu soruda süratle cevaba gitmektedir. Tura gelme ihtimali adil bir bozuk para ile yüzde 50, her iki tarafı da tura olan ile ise yüzde 100’dür. Bu nedenle çok rahat bir şekilde arkadaşınızın torbadan iki tarafı da tura olan parayı iki kat daha fazla ihtimalle ya da yüzde 100/yüzde 50 çektiğini rahatlıkla söyleyebiliriz.

Şimdi şöyle inceleyelim. Bu sefer arkadaşınız dokuz adil para ve bir tane de iki tarafı tura olan bir para gösteriyor ve bu 10 paranın hepsini bir torbaya koyuyor, rastgele birini seçiyor ve

havaya atıyor: Tura. Şimdi ne düşünürsünüz? Bu adil bir paramıdır yoksa iki tarafı da tura olan para mı?

Laplace'ın çalışması bu değişikliğin üzerine eğildi ve burada da yine cevap etkileyici bir şekilde çok basitti. Daha önce de olduğu gibi, adil bir paranın tura gelme ihtimali, iki tarafı da tura olanın yarısı kadardır. Ancak şimdi, adil bir para aynı zamanda ilk olarak torbadan seçilme anlamında dokuz kat daha olasıdır. Sonuçta sadece bu iki değerlendirmeyi alarak ikisini çarpmamızın yeterli olduğu ortaya çıkmaktadır. Arkadaşınızın elindeki paranın adil bir para olma olasılığı, iki tarafı da tura olan bir para olma olasılığından tam olarak 4,5 kat daha fazladır.

Daha önceki görüşlerimizle gözlerimizin hemen önündeki kanıtları birbirine bağlayan bu durumu açıklayan matematik formülü, işin çok büyük kısmı Laplace tarafından yapılmış olmasına karşın ironik bir şekilde **Bayes Kuralı** olarak bilinmektedir. Ve bu kural, mevcut inanışların gözlenen kanıtlarla nasıl birleştirileceği problemine basit bir çözüm sunmaktadır: Olasılıklarını birbirleriyle çarpın.

Görülmektedir ki bu formülün işe yaraması için *bazı* önceden gelen inanış ya da düşüncelerin olması önemlidir. Eğer arkadaşınız size gelip sadece “Bu torbadan bir bozuk para çektim, attım ve tura geldi. Bunun adil para olma olasılığının ne olduğunu düşünüyorsun?” deseydi en azından ilk olarak torbadaki paralar hakkında bilgi sahibi olmadığınız sürece bu soruyu cevaplayamazdınız. (Elinizde olasılıklardan biri olmadığı sürece iki olasılığı birbiriyle çarpamazsınız.) Parayı atmadan önce “torbada ne olduğu” anlayışı -herhangi bir veri almadan önce her hipotezin doğru olma şansı- öncelikli olasılık ya da kısaca öncelik olarak bilinmektedir. Ve Bayes Kuralı her zaman sizden sadece bir tahmin bile olsa öncül bir bilgiye ihtiyaç duyar. Her iki tarafı tura olan kaç para vardır? Bunları elde etmek ne kadar kolaydır? Arkadaşınız ne kadar hilebazdır?

Bayes kuralının öncüllerin kullanımına bağımlı olduğu gerçeğinin tarihte kimi zaman tartışmalı, ön yargılı ve hatta bilimsel olmadığı tartışılmıştır. Fakat gerçekte, zihnimizin tamamen bomboş olduğu bir durumla karşılaşmak çok ama çok alışılmadık ve nadir bir durumdur.

Bu arada, öncül olasılıklar hakkında bir tahmininiz olduğunda Bayes Kuralı çok geniş problem yelpazesine uygulanabilir, ister büyük veri ya da ister daha yaygın küçük veri türünden olsun. Bir çekilişi kazanma ya da tura gelme olasılığını hesaplamak sadece bir başlangıçtır. Bayes ve Laplace tarafından geliştirilen metotlar önünüzde belirsizlik ve bir miktar da üzerinde çalışılacak veri olduğunda her seferinde size yardımcı olabilir. Ve geleceği tahmin etmeye çalıştığımız her seferinde karşılaştığımız durum tam olarak budur.

Kopernik Prensibi

Özellikle gelecek söz konusu olduğunda tahminde bulunmak zordur.

—Danimarka Atasözü

J. Richard Gott Berlin Duvarı'na ulaştığında kendisine çok basit bir soru sordu. *Neredeyim ben?* Yani bu yapının yaşı göz önüne alındığında, ben bu duvara yaşamının neresinde rastladım? Aslında bir bakıma astronom Nikola Kopernik'in 400 sene önce saplantısı olan uzaya dair sorusunun daha dünyevi bir versiyonunu soruyordu: Bizler neredeyiz? Dünya evrende nerede yer alıyor? Kopernik dünyanın evrenin merkezinde olmadığına dair radikal paradigma değişimine neden olacaktı. Dünya aslında özellikle belirli bir yerde değildi. Gott da zamanla ilgili olarak aynı adımı atmaya karar verdi.

O da Berlin Duvarı'na rastladığı anın özel olmadığı varsayımında bulundu. Duvarın tüm yaşamı içerisindeki herhangi bir

ana eşit değerde olan bir andı. Ve eğer her an eşit şekilde muhtemel ise o zaman ortalama olarak oraya varışı tam olarak orta noktaya denk gelmiş olmalıydı (çünkü yarıdan önceye düşmüş olma olasılığı yüzde 50 ve arkasına düşme olasılığı yüzde 50'dir). Genelleyecek olursak; daha iyi bilgi sahibi olmadığımız sürece *herhangi* bir fenomenin sürecinin tam olarak ortasına denk geldiğimizi varsayabiliriz.* Ve eğer bir sürecin tam olarak ortasında olduğumuzu varsayarsak, bu sürecin gelecekte daha ne kadar süreceğine dair yapabileceğimiz en iyi tahmin çok açık bir şekilde ortada olur: *O ana kadar ne kadar sürdüyse o kadar.* Gott Berlin Duvarı'nı inşa edildikten sekiz sene sonra görmüştü, bu nedenle yapabileceği en iyi tahmin sekiz sene daha duvarın orada durmaya devam edeceğini idi. (Duvar 20 sene daha orada durdu.)

Gott'un Kopernik Prensibi olarak adlandırdığı bu basit mantık her türden tahminde bulunmak için kullanılabilecek basit bir algoritma olarak sonuçlanmaktadır. Daha önceden edinilmiş hiçbir beklenti olmaksızın bunu sadece Berlin Duvarı'nın sonu için değil, aynı zamanda diğer pek çok kısa ya da uzun geçmişe sahip fenomenler için kullanabiliriz. Kopernik Prensibi ABD'nin yaklaşık 2255 senesine kadar varlığını sürdüreceğini, Google şirketinin 2032'ye kadar ayakta kalacağını ve bir ay önce tanıştığınız biriyle ilişkinizin bir ay kadar daha süreceğini ön görmektedir. Benzer şekilde bize başlığında "2525" yazan ve resim olarak elinde altı inç ekranlı bir akıllı telefon tutan bir adam gördüğümüzde şüpheli yaklaşmamızı söylemektedir. Bu durum şüpheli yaklaşmayı gerektirir çünkü bildiğimiz kadarıyla akıllı telefonların geçmişi ancak 10 sene kadardır ve Kopernik Prensibi bize bırakın beş asır sonrasını, 2025 civarlarında artık var olmayaca-

* Burada çok açık bir ironi bulunmaktadır. Söz konusu zaman olduğunda, bizim geliş anımızın herhangi özel bir an olmadığını varsaymak, kendimizi her şeyin ortasında kabul etmekle sonuçlanır.

ğını söylemektedir. 2525 senesi geldiğinde, New York şehri yerinde duruyor ise şaşırtıcı bir durum olacaktır.

Daha uygulamaya dönük bir örnek verecek olursak; eğer son iş kazasının daha yedi gün önce yaşandığına dair tabelaları olan bir inşaat alanında işe girmeyi düşünüyorsak, yapmayı planladığımız iş özellikle çok kısa sürecek bir iş olmadığı sürece uzak kalmayı isteyebiliriz. Ve eğer bir belediyedeki ulaştırma sistemi insanlara bir sonraki otobüsün ne zaman durağa geleceğini söyleyen inanılmaz derecede faydalı fakat pahalı gerçek zamanlı bilgi veren sistemi maddi olarak karşılayamıyorsa, Kopernik Prensibi çok daha basit ve ucuz bir alternatif olduğunu söyler. Sadece bir önceki otobüsün oradan ne zaman geçtiğini gösteren bir sistem bir sonrakinin ne zaman geleceğine dair bir ipucu sunabilir.

Ancak peki Kopernik Prensibi doğru mudur? Gott kendi varsayımını ve düşüncesini *Nature*'da yayınladıktan sonra dergiye pek çok eleştiri geldi. Ve daha alışılmış örneklerle bu kuralı uyguladığımızda, bunun nedenini anlamak oldukça kolaydır. Eğer 90 yaşında bir kişiyle tanışırsanız, Kopernik Prensibi size bu kişinin 180 yaşına kadar yaşayacağını söylemektedir. Bu esnada, altı yaşındaki her çocuk 12 yaşı civarında erken bir ölümle karşılaşacaktır.

Kopernik Prensibinin işe yaramasının ve bazen de yaramasının nedenini anlamak için Bayes'e geri dönmemiz gerekir. Kopernik Prensibi, görünüşteki tüm basitliğine rağmen aslında Bayes Kuralının bir örneğidir.

Bayes Kopernik ile Karşılaşıyor

Berlin Duvarı'nın ne kadar süre ayakta kalabileceği gibi geleceği tahmin ederken değerlendirmemiz gereken hipotezler, tüm olası zamanlardır: Bir hafta mı sürecek, yoksa bir ay, bir yıl ya da on yıl mı? Bayes Kuralını uygulamak için daha önce de görmüş

olduğumuz gibi, ilk olarak bu sürelerin her biri için öncül bir olasılık atamamız gerekir. Ve sonuçta Kopernik Prensibi aslında tam olarak, bilgisiz bir öncül olarak bilinen şeyi kullanarak Bayes Kuralını uygulamaktan ortaya çıkan şeydir.

Bu husus, ilk başta bir çelişki gibi görünebilir. Eğer Bayes Kuralı her zaman bizim önceki beklenti ve inanışlarımızı belirtmemizi gerektirirse, hiç olmadığında bunları nasıl söyleyebiliriz? Bir çekiliş örneğinde olduğu gibi, konu hakkında bilgi sahibi olmamak, kazanan biletlerin her oranının eşit şekilde olası olduğunu öngören “uniform öncül” denen şeyi varsaymak olur.* Berlin Duvarı örneğinde bilgi sahibi olmayan bir öncül, tahmin etmeye çalıştığımız zaman aralığı hakkında hiçbir şey bilmediğimizi söylemek anlamına gelir. Duvar beş dakika içerisinde de yıkılabilir, önümüzdeki milenyumda da.

Bu bilgisiz öncülden ayrı bir şekilde Bayes Kuralı için sağladığımız tek bilgi, daha önceden de görmüş olduğunuz gibi Berlin Duvarı ile sekiz yaşında karşılaşmış olmamızdır. Bu nedenle duvara sekiz seneden daha kısa bir ömür biçen hipotez derhâl reddedilecektir çünkü bu hipotezler bizim durumumuzu hiç açıklayamamaktadır. (Benzer şekilde iki tarafı da tura olan bir para, ilk yazı gelmesi olayında derhâl elenir.) Sekiz seneden daha uzun süreler olasılık âleminin içindedir lakin eğer bu duvar bir milyon yıl boyunca orada olacaksa, bizim bu duvara ömrünün henüz çok başlarında rastlamış olmamız büyük bir tesadüf olacaktır. Bu nedenle, çok uzun ömür süreleri elenemese de çok olası olmazlar.

Bayes Kuralı tüm bu olasılıkları -daha olası kısa süreler orta-

* Bu durum, Laplace Kanununun en basit hâliyle yaptığı şeydir. Biletlerin yüzde 1'i ya da yüzde 10'unun kazanan olmasının tıpkı yüzde 50 ya da yüzde 100 olması durumundaki gibi olduğunu varsayar. $[(w+1)/(n+2)]$ formülü, tek bilet alıp kaybettiğinizde bir sonrakinde kazanma olasılığınızın 1/3 olduğu varsayımından yola çıkılırsa safça bir yaklaşım gibi görünebilir fakat bu sonuç bir çekilişe hiçbir şey bilmeden katıldığınızdaki olasılıkları yansıtmaktadır.

lama tahmini aşağı doğru çekerken daha az olası ancak yine de olası uzun süreli olanlar ortalamayı yukarıya doğru iterek- birleştirdiğinde Kopernik Prensibi ortaya çıkar. Eğer bir şeyin ne kadar süreceğini tahmin etmek istersek ve bunun hakkında başka hiçbir bilğimiz yoksa, yapabileceğimiz en iyi tahmin şu ana kadar ne kadar var olduysa o kadar daha var olmaya devam edecektir.

Gott aslında Kopernik Prensibi gibi bir şeyi öneren ilk kişi değildi. 20'nci yüzyılın ortalarında Bayes istatistikçisi Harold Jeffreys sadece tek tramvay vagonu üzerindeki seri numarasına bakarak bir şehirdeki tramvay vagonlarının sayısını belirleme üzerine çalıştı ve aynı sonuca ulaştı: Seri numarasının iki katı. Hatta benzer bir problem daha önceleri, İkinci Dünya Savaşı sırasında müttefikler tarafından Almanların ürettikleri tankların sayısını hesaplamaya çalışırken ortaya çıkmıştı. Ele geçirilen tankların seri numaralarına dayalı olarak tamamen matematiksel tahminler Almanların her ay 246 tank ürettiklerini ileri sürerken oldukça geniş kapsamlı (ve riskli) hava keşifleriyle elde edilen tahminler bu sayının daha çok 1.400 civarında olduğunu ileri sürmekteydi. Savaştan sonra Alman kayıtlarından bu sayının 245 olduğu ortaya çıkacaktı.

Kopernik Prensibini sadece bilgisiz bir öncülü olan Bayes Kuralı olarak algılamak geçerliliği hakkında pek çok soruyu yanıtlamaktadır. Kopernik Prensibi elimizde hiçbir şeyin olmadığı durumlarda -1969 senesinde Berlin Duvarı'na bakarken ve nasıl bir zaman çizelgesinin uygun olacağından emin olmadığımızda olduğu gibi- akla yatkın gibi görünmektedir. Ve konu hakkında bir şeyler bildiğimiz durumlarda da tamamen yanlış gibi olmaktadır. 90 yaşındaki bir adamın 180 sene yaşayacağını tahmin etmek, tam olarak bir insanın yaşam uzunluğu hakkında bir şeyler bilerek konuya girdiğimiz için mantıksızdır. Bayes Kuralına ne kadar zengin bir öncül bilgi getirirsek, o kadar faydalı tah-

minler elde ederiz.

Gerçek Dünya Öncülleri...

En geniş anlamıyla dünyada iki çeşit şey vardır: Bir tür “doğal” değer etrafında toplanan şeyler ve toplanmayanlar.

İnsan yaşam uzunlukları açık bir şekilde ilk kategoriye girmektedir. Kabaca “normal” dağılım -aynı zamanda Alman matematikçi Carl Friedrich Gauss’un ardından “Gauss” dağılımı olarak da bilinmektedir- denen dağılım şeklini ya da gayriresmi olarak kendine has şekli nedeniyle “çan eğrisi” denen dağılımı sergilerler. Bu şekil insan hayatlarının uzunluğunun özelliklerini yansıtmada oldukça işe yarar. Örneğin ABD’de erkekler için ortalama yaşam süresi 76 civarındadır ve bu sayının her iki tarafına doğru gidildikçe olasılıklar oldukça hızlı bir şekilde düşer. Normal dağılımların tek uygun ölçeğe sahip olma gibi bir eğilimi bulunur. Tek rakamlı bir yaşam süresi trajik, üç haneli bir yaşam süresi ise sıra dışı olarak değerlendirilir. Doğal yaşamdaki diğer birçok şey de normal dağılım sergilemektedir: İnsanların ağırlık ve boylarından tansiyonlarına, bir şehirdeki öğle saati sıcaklığından bir meyve bahçesindeki meyvelerin çapına kadar.

Ancak dünyada normal dağılıma uyuyor gibi görünmeyen bazı şeyler vardır. Örneğin, ABD’deki bir kasabanın ortalama nüfusu 8.226’dır. Eğer kasabaların nüfuslarına göre sayılarını gösteren bir grafik hazırlarsanız çan eğrisine uzaktan bile benzeyen bir şey göremezsiniz. 8.226’dan daha az nüfusa sahip olan kasaba sayısı, bu sayıdan fazla nüfusa sahip kasabaların sayısından oldukça fazladır. Aynı zamanda büyük kasabalar ortalama-dan oldukça fazla nüfusa sahiptirler. Bu tarz bir görüntü “kuvvet yasası dağılımı” denen şeyi simgeler. Bunlar aynı zamanda ölçeksiz dağılımlar olarak bilinirler çünkü birçok ölçek üzerinde değişebilen büyüklüklerin özelliklerini taşımaktadırlar. Bir kasabanın onlarca, yüzlerce, binlerce, on binlerce, yüz binlerce ya da

milyonlarca sakini olabilir, bu nedenle “normal” bir kasabanın ne kadar büyüklükte olması gerektiğine tek değeri gösteren bir etiket takamayız.

Kuvvet yasası dağılımı kasaba nüfusları gibi aynı temel özelliğe sahip birçok gündelik yaşam fenomeninin özelliklerini temsil eder: Birçok şeyin ortalamanın altında olduğu ve birkaç çok büyük değerin üzerinde olduğu. Dört haneli sayılardan 10 hanelilere kadar değişen sinema filmleri gişe hasılatları bunlara bir diğer örnektir. Birçok film aslında neredeyse hiç para kazandırmaz fakat nadiren gelen Titanic gibi filmler isimleri gibi büyük hasılatlar yaparlar.

Aslında paranın yer aldığı alanlar, genel olarak kuvvet yasalarının çok olduğu alanlardır. Kuvvet yasası dağılımları insanların hem varlıklarını hem de gelirlerini karakterize eder. Örneğin Amerika’daki ortalama gelir 55.688 dolardır fakat gelir kabaca kuvvet yasası dağılımına sahip olduğu için yine burada da biliyoruz ki birçok kişi bu rakamın altında gelir elde ederken üzerinde elde eden az sayıda kişi ise çok yüksek rakamlar kazanacaktır. Ve durum gerçekte tam olarak böyledir. ABD nüfusunun üçte ikisi bu değer altında gelire sahipken en üst yüzde 1’lik dilimde kazananlar ise bu ortalama rakamın neredeyse 10 katı kadar kazanmaktadır. Ve bu yüzde 1’lik dilimin de yüzde 1’lik dilimi bu rakamın da 10 katını kazanmaktadır.

“Zenginlerin daha da zenginleşeceği” genellikle söylenir ve “ayrıcalıklı ek” böyle bir dağılımı yaratmanın en garanti yollarından biridir. En popüler web siteleri gelen linkleri kabul etme yönünden en muhtemel olanlar, en çok takipçisi olan ünlüler muhtemelen en fazla yeni hayran ve takipçi edinecek olanlar, en prestijli şirketler muhtemelen yeni müşterileri en fazla çekecek olanlar, en büyük şehirler de muhtemelen yeni sakinleri en çok çekecek olanlar olacaktır. Her durumda, sonuçta bir kuvvet yasası dağılımı olacaktır.

Bayes Kuralı bize iş sınırlı kanıta dayalı olarak tahminde bulunmak olduğunda, çok az şeyin iyi öncüllere sahip olmak kadar önemli olduğunu söylemektedir. Bu da kanıtların geldiğini umduğumuz bir dağılımdır. Normal dağılım ve kuvvet yasası dağılımıyla ilgilendiğimizde, iyi tahminler bu nedenle iyi içgüdülere sahip olmakla başlar. Bayes Kuralı bize bunların her biri için basit ancak önemli derecede farklı bir geçerlilik kuralı sunmaktadır.

...ve Onların Tahmin Kuralı

“Bu sonsuza kadar sürebilir” derken iyi bir şey mi kastettiniz?

—Ben LERNER

Kopernik Prensibini incelerken Bayes Kuralına bilgiye dayanan bir öncül verildiğinde her zaman bir nesnenin toplam ömrünün tam olarak mevcut yaşının iki katı olacağı tahmininde bulunduğunu gördük. Aslında oldukça fazla şekilde çeşitli muhtemel ölçeğe sahip bilgiye dayalı olmayan öncül -dört ay ya da bir milenyum ayakta durabilecek duvar- bir kuvvet yasası dağılımıdır. Ve herhangi bir kuvvet yasası dağılımı için, Bayes Kuralı uygun tahmin stratejisinin **Çarpım Kuralı** olduğuna işaret eder: O ana kadar gözlenen değeri sabit bir faktör ile çarpın. Bilgiye dayalı olmayan bir öncül için bu sabit faktör iki olmaktadır. Diğer kuvvet yasası durumlarında, çarpan tam olarak çalışmakta olan dağılıma göre olacaktır. Örneğin gişe hasılatları için 1,4 civarında bir rakamdır. Bu nedenle eğer bir filmin şu ana kadar altı milyon dolar hasılat elde ettiğini duyarsanız, toplamda 8,4 milyon dolar yapacağını tahmin edebilirsiniz. Eğer o ana kadar 90 milyon dolar gişe hasılatı yapmış ise bu rakam 126 milyon dolar olacaktır.

Bu çarpım kuralı, kuvvet yasası dağılımlarının tanımladıkları

olgu için doğal bir ölçek belirtmemesinin doğrudan bir sonucudur. Tahminlerimiz için bize bir ölçek duygusu sağlayan tek şey bu nedenle elimizdeki tek veri değeridir, tıpkı Berlin Duvarı'nın sekiz yıldır orada olması gibi. Bu tek veri noktasının değeri ne kadar büyük olursa, muhtemelen uğraşmakta olduğumuz ölçek de o kadar büyük olacaktır ya da tam tersi. Bir filmin gösterime girdiği ilk saatlerde altı milyon dolarlık hasılat yapacak bir hit olması *muhtemeldir* fakat sadece tek rakamlı bir gişe hasılatına sahip olacak bir film olması daha muhtemeldir.

Diğer taraftan normal dağılımı bir öncül olarak Bayes Kuralı'na uyguladığımızda bize çok farklı türden bir yol gösterilir. Çarpım kuralı yerine karşımıza **Ortalama Kuralı** çıkar: Dağılımın “doğal” ortalamasını -tek ve belirli ölçeğini- rehberiniz olarak kullanın. Örneğin eğer bir kişi ortalama yaşam süresinden daha genç ise sadece ortalama yaşam süresini tahmininiz olarak kullanın. Bu kişi ortalama yaşam süresine yaklaştıkça ve geçtikçe, o zaman birkaç yıl daha yaşayacağı tahmininde bulunun. Bu kuralı uygulamak 90 ve altı yaşındaki birer kişi için akla yatkın tahminlerde bulunulmasını sağlar: 94 ve 77. (Altı yaşındaki ortalama yaşam süresi olan 76'dan biraz fazla tahmin almaktadır çünkü bebeklik dönemini atlattığını ve dağılım şeklinin sol taraftaki kuyruğunda yer almadığını biliyoruz.)

Sinema filmlerinin süreleri de insan yaşam süreleri gibi normal bir dağılıma sahiptirler. Birçok film süre bakımından 100 dakika civarında kümelenir ve bundan ayrılan sayılar dağılım grafiğinin kuyruk kesimlerine düşerler. Ancak tüm insan davranışları bu şekilde bir karaktere sahip değildir. Şair Dean Young bir keresinde ne zaman numaralanmış bölümleri olan bir şiir dinlese, eğer şiiri okuyan kişi dördüncü bölümün başlangıcını anons ederse kalbinin ağrıdığını söylemiştir. Eğer üçten fazla bölüm varsa artık yapacak bir şey kalmamıştır ve Young'ın biraz daha dinleyebilmek adına çok çaba harcaması gerekecektir. Young'ın

bu karamsarlığının aslında tam olarak Bayes-vari bir yaklaşım olduğu ortaya çıkmıştır. Şiirler hakkında yapılan bir analiz, sine-ma filmlerinin aksine şiirlerin normal dağılımdan çok kuvvet yasası dağılımına daha yakın bir dağılıma uyduğunu göstermektedir. Şiirlerin çoğu kısadır lakin bazıları epiktir. Bu nedenle şiir sanatı söz konusu olduğunda, rahat bir koltukta oturduğunuzdan emin olun. Aşırı uzun sürüyor gibi görünen normal dağılıma sahip bir şey kısa süre içinde sonlanacaktır fakat kuvvet yasası dağılımındaki bir şey ne kadar uzun sürerse daha da uzun sürmesini bekleyebilirsiniz.

Gerçek yaşamda bu iki uç arasında üçüncü bir kategori daha vardır: Bir süredir devam ettikleri için ne daha az ne de daha çok ihtimalle sona erecek olanlar. Bazen olan sadece şudur; bazı şeyler değişmezler. Bu olgu üzerine çalışmış olan Danimarkalı matematikçi Agner Krarup Erlang şimdilerde kendi ismi olan Erlang dağılımına uyacak şekilde bağımsız olaylar arasındaki zaman aralıklarının dağılımlarını biçimlendirmiştir. Bu eğrinin şekli hem normal hem de kuvvet yasası dağılımlarından ayrılmaktadır. Kanat benzeri, hafif bir tümsek yapacak şekilde yükselen ve kuvvet yasası dağılımından daha hızlı ancak normal bir dağılımdan daha yavaş düşen kuyruğu olan bir çizgisi vardır. 20'nci yüzyılın başlarında Kopphenag Telefon Şirketi için çalışan Erlang bu dağılımı bir telefon şebekesinde art arda yapılacak telefon görüşmeleri için ne kadar zamanın geçmesinin beklenmesi gerektiğini modellemek için kullanmıştır. O zamandan bu yana Erlang dağılımı aynı zamanda şehir planlamacıları ve mimarlar tarafından araç/yaya trafiğini modellemek için ve ayrıca ağ mühendisleri tarafından internet altyapısını tasarlamak için kullanılmıştır. Doğal yaşamda olayların tamamen birbirlerinden bağımsız olduğu ve bu nedenle aralarındaki zaman aralıklarının bir Erlang eğrisine uyduğu alanlar mevcuttur. Erlang dağılımının bir Geiger sayacındaki bir sonraki tıklamayı ne zaman bekleye-

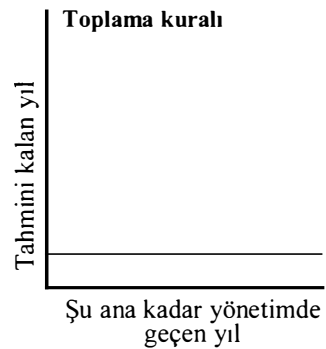
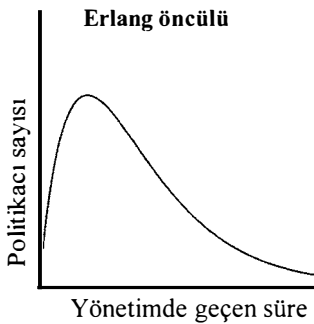
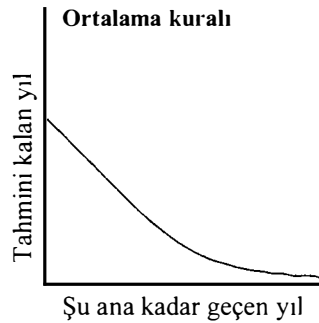
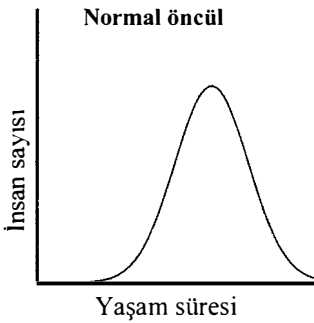
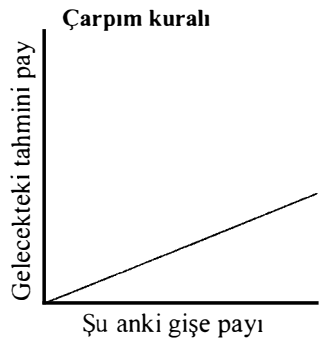
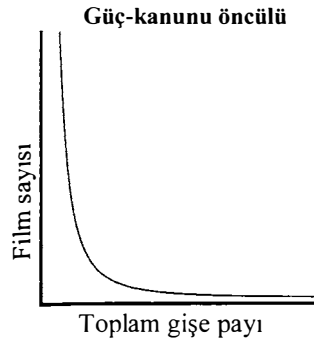
ceğimiz konusunu kusursuz bir şekilde modellediği anlamına gelen radyoaktif bozunma bunlara bir örnektir. Aynı zamanda siyasilerin Temsilciler Meclisi'nde ne kadar kalacakları gibi insanların yaşamlarındaki bazı şeyleri tanımlarken de çok iyi bir iş çıkarmaktadır.

Erlang dağılımı bize üçüncü bir tahmin kuralı sunmaktadır. **İlave Kuralı**, bir şeylerin daha ne kadar devam edeceği konusunda her zaman sabit bir miktar tahmininde bulunur. Bir kişinin evden çıkmak için hazır olacağı zaman ya da bir işi tamamlaması için kalan süreyi anlatan “Sadece beş dakika daha!... [beş dakika sonra da] Beş dakika daha!” ifadelerine alışkınsınızdır ve bunlar gerçekçi tahminlerde bulunmada bazı kronik hataların işaretçisi gibi görünebilirler. Bir kişi Erlang dağılımına karşı durduğunda bu söz doğru çıkmaktadır.

Örneğin bir kumarbaz sabırsız eşine bir kez daha 21'i tuttduğunda masadan kalkacağını söylerse (ki buradaki oranlar 20'de 1 gibidir) rahatlıkla “20 el oynadıktan sonra işim bitecek” tahmininde bulunabilir. Eğer şanssız geçen 20 elden sonra eş kendisini şimdi ne kadar bekleteceğini sorarsa cevabı değişmeyecektir. “20 el oynadıktan sonra işim bitecek!” Yorgunluk nedir bilmeyen 21 oyuncumuzun kısa süreli hafızası varmış gibi görünebilir fakat gerçekte olan şey, tahmininin tamamen doğru olduğudur. Aslında aynı tahmini üreten dağılımlar, geçmişleri ya da şimdiki durumları her ne olursa olsun, istatistikçiler tarafından “hafızasız” olarak bilinir.

Çarpım, Ortalama ve İlave kurallarının birbirinden farklı bu üç optimal tahmin şeklinin hepsi Bayes Kuralını kuvvet yasası, normal ve Erlang dağılımlarına uygulamanın sonucudur. Ve bu tahminlerin ortaya çıkış yöntemleri göz önüne alındığında üç dağılım bize belirli olaylar karşısında ne kadar *şaşkın* olmamız gerektiği konusunda yol göstermektedir.

Bir kuvvet yasası dağılımında bir şey ne kadar uzun süre de-



Farklı öncül dağılımlar ve tahmin kuralları

vam etmişse onun daha uzun bir süre devam etmesini bekleriz. Bu nedenle bir kuvvet yasası olayında ne kadar beklersek o kadar şaşırtıcı olur ve en fazla da gerçekleşmeden hemen önce şaşırtırız. Bir ülke, şirket ya da kuruluş her geçen sene sadece saygı

uyandıracak bir şekilde büyür, bu nedenle çöküşünü görmek her zaman şaşırtıcıdır.

Normal bir dağılımda olaylar erken gerçekleştiklerinde şaşırtıcıdır -çünkü onların ortalamayı yakalamalarını bekleriz- ancak geciktikleri zaman şaşırtıcı olmazlar. Aslında gecikme anı geldiğinde ne kadar daha beklersek, gerçekleşmesini o kadar beklemiş oluruz.

Ve bir Erlang dağılımında olaylar tanımları itibariyle ne zaman gerçekleşirse gerçekleşsin ne daha çok ne de daha az şaşırtıcıdır. Herhangi türden bir ilişki, ne kadar sürmüş olduğundan bağımsız bir şekilde eşit bir olasılıkla bitme olasılığındadır. Siyasilerin her zaman bir sonraki seçimleri düşünüyor olmalarına şaşmamak lazım.

Kumar oynamak benzer şekildeki sürekli beklenti içinde olmakla tanımlanır. Eğer normal dağılımla tanımlanmış bir rulette bir kez kazanmayı bekliyorsanız, o zaman ortalama kuralı uygulanacaktır. Bu kural size, birkaç kötü şans serisi sonrasında numaranızın her an gelecek olması gerektiğini söyleyecektir ve bu şansınızdan sonra muhtemelen birkaç kayıp yaşayacağınız turlar olacaktır. (Bu durumda, bir sonraki kazanacağınız oyuna kadar ısrar etmek ve ardından oyunu bırakmak mantıklı olacaktır.) Eğer bir kazanma turu için olan bekleme kuvvet yasası dağılımına tabi ise çarpım kuralı size kazanan turların birbirlerini kısa aralıklarla takip edeceğini ve kazançsız bir bekleyişin de uzadıkça muhtemelen daha uzayacağını söyleyecektir. (Bu senaryoda ise kazandığınız bir turdan sonra bir süre daha oynamanız ve sonrasında birkaç el kaybettikten sonra bırakmanız gerekir.) Fakat hafızasız bir dağılıma karşı ne yaparsanız yapın zordasınız. İlave kuralı size şimdiki kazanma şansınızın bir saat öncekiyle ve bir saat sonrakiyle aynı olduğunu söyleyecektir. Hiçbir şey asla değişmez. Ne bekleyip kazandığınız için, ne de bir kaynama noktasında kayıplarınızı durdurduğunuz için ödüllendirilmezsi-

niz. Kenny Rogers “*Kumarbaz (The Gambler)*” kitabında “Ne zaman yürümeniz ne zaman da koşmanız gerektiğini bilmeniz” tavsiyesinde bulunmaktadır lakin hafızasız bir dağılımda oyunu bırakmak için doğru zaman *yoktur*. Bu durum oyunların bağımlılık yaratmasının nedenini açıklayabilir.

Hangi dağılım ile karşı karşıya olduğunuzu bilmek çok büyük fark yaratabilir. Harvard’lı biyolog ve bilimi popüler hâle getiren üretken Stephen Jay Gould kanser olduğunu öğrendiğinde verdiği ilk tepki tıp literatüründe konuyla ilgili yayınları okumak olmuştu. Doktorlarının bunu yapmasını neden istemediğini daha sonra anladı. Aynı tür kansere yakalanan başka hastaların yarısı teşhis konulduktan sonra sekiz ay içerisinde hayatlarını kaybetmişlerdi.

Ancak sadece o istatistik -sekiz ay- hayatta kalanların dağılımı hakkında hiçbir şey söylemiyordu. Eğer normal bir dağılım olsaydı, Ortalama Kuralı daha ne kadar yaşamayı beklemesi gerektiği konusunda ona oldukça kesin bir tahminde bulunabilirdi: Sekiz ay kadar. Eğer sağa oldukça uzayan bir kuyruğa sahip kuvvet yasası dağılımı olsaydı, durum oldukça farklı olacaktı. Çarpım Kuralı ona ne kadar uzun yaşarsa, o kadar çok yaşayacağına dair kanıt sunacaktı. Gould biraz daha okuyarak “dağılım aslında sağa doğru eğimliydi ve küçük de olsa uzun bir kuyruk sekiz aylık medyanı yıllar ile ölçülecek şekilde aşmaktaydı. O küçük kuyrukta olmamam için bir neden görmedim ve oldukça rahatlatıcı bir şekilde iç çektim” dedi. Gould teşhisinden sonra 20 yıl daha yaşayacaktı.

Küçük Veri ve Akıl

Üç tahmin kuralı -Çarpım, Ortalama ve İlave- geniş bir günlük yaşam yelpazesine uygulanabilir. Ve bu durumlarda insanlar genellikle dikkate değer bir şekilde doğru tahmin kuralını kullanma konusunda iyidirler. Tom üniversitedeyken, MIT’den Josh

Tenenbaum'la birlikte insanlara her bir durumda sadece bir veriye (o anki yaş, o ana kadar kazanılan gişe hasılatı ve o ana kadar mecliste geçirilen süre) dayanan bir dizi günlük değerler-insanların ortalama yaşam süreleri, filmlerin gişe hasılatları ve ABD temsilcilerinin mecliste ne kadar kalacakları gibi- ile ilgili tahminlerini sordukları bir deney yaptı. Daha sonra insanların yaptıkları tahminlerle Bayes Kuralını uyguladıkları bu alanlardan gelen gerçek verileri karşılaştırdılar.

Sonuçta insanların yapmış olduğu tahminlerin Bayes Kuralı ile üretilmiş olanlara aşırı derecede yakın olduğu ortaya çıktı. İnsanlar içgüdüsel olarak gerçek dünyada farklı dağılımlara-kuvvet yasası, normal ve Erlang- sahip değerler için farklı türden tahminlerde bulunmuşlardı. Diğer bir deyişle hangi durumun Çarpım, Ortalama ya da İlave kuralına uyduğunu bilmeyebileceğiniz veya hatırlayamayabileceğinize rağmen her gün yaptığınız tahminler farklı dağılımlara sahip ve farklı şekillerde davranan farklı durumları açık bir şekilde yansıtmaktadır.

Bayes Kuralı hakkında bildiklerimizin ışığında insanların dikkat çekici bu performansı, insanların nasıl tahmin yaptığını anlamamıza yardım eden önemli bir şey ileri sürmektedir. *Küçük veri, kılık değiştirmiş büyük veridir.* Az sayıdaki gözlemden -ya da sadece birinden- hareketle genellikle iyi tahminlerde bulunmamızın nedeni öncüllerimizin oldukça zengin olmasıdır. Farında olsak da olmasak da aklımızda film gişe hasılatları ve süreleri, şiir uzunlukları ve meclisteki hizmet süresine ilişkin bilgiler ve bir de insan yaşamları (aslında bunu söylemeye bile gerek yok) gibi şaşırtıcı derecede net ve kesin öncüller taşır gibiyiz. Bunları açık bir şekilde bir araya getirmemize gerek yoktur, bunları dünyadan âdeta emerek içimize çekeriz.

Bir bütün olarak insanların içine doğan hislerin Bayes Kuralı tahminlerini çok yakından olacak şekilde yakalıyor olması gerçeği her türden öncül dağılımını, hatta gerçek dünya verisini al-

manın çok daha zor olduklarını bile ters mühendisliğe tabi tutmamızı mümkün kılar. Örneğin müşteri hizmetleri tarafından bekletilmek insanların yaşadığı tecrübeler arasında oldukça yaygındır fakat Hollywood gişe hasılatları gibi herkese açık bir şekilde bu bekleme sürelerine ilişkin bir veri bulunmamaktadır. Ancak insanların tahminleri eğer kendi tecrübelerinden bilgi sağlarsa, Bayes Kuralını insanların beklentilerini âdeta deşerek dünya hakkında dolaylı bir keşif yapmak için kullanabiliriz. Tom ve Josh insanlara tek gözlemden telefonda bekleme sürelerini tahmin etmelerini istediklerinde sonuç deneklerin Çarpım Kuralını kullandıkları yönündeydi. İnsanların beklediği toplam bekleme süresi, o ana kadar beklemiş olduklarının 1,33 katı kadardı. Bu durum birçok ölçeğin mümkün olduğu kuvvet yasası dağılımına sahip olmakla tutarlıdır. Sadece telefonda bekleme sürelerinin *Titanic* versiyonuyla karşılaşmamaya dua edin. Geçen son 10 yılda, bunlar gibi yaklaşımlar beyin üzerine çalışan bilim insanlarının görme yetisinden dile kadar geniş bir alanda insanların öncül dağılımlarını belirlemesini mümkün kılmıştır.

Burada dikkat edilmesi gereken bir husus vardır. İyi öncüllerimizin olmadığı durumlarda tahminlerimiz iyi değildir. Örneğin Tom ve Josh'ın çalışmasında insanların tahminlerinin genel olarak Bayes Kuralından uzaklaştığı bir konu vardı. Mısır firavunlarının tahtta kalma sürelerini tahmin etmekte zorlandıkları ortaya çıkmıştı. (Firavunların Erlang dağılımına göre tahtta kaldıkları ortaya çıkmıştır.) İnsanların bu değerlerle günlük olarak karşılaşmamaları nedeniyle tahminleri elbette hatalı olmuştu. İyi tahminler, iyi öncüller gerektirir.

Bunun bir dizi önemli uygulamaları mevcuttur. Muhakemelerimiz beklentilerimizi, beklentilerimiz de geçmiş tecrübelerimizi ele verir. Gelecekte beklentilerimiz, içinde yaşadığımız dünya ve kendi geçmişimiz hakkında pek çok şeyi ortaya çıkarır.

Tahminlerimiz Kendi Hakkımızda Neler Anlatır

Walter Mischel 1970'lerin başlarında meşhur "Marshmallow Testini" yaptığında tatmin duygusunu geciktirme yeteneğinin yaşla birlikte nasıl geliştiğini anlamaya çalışıyordu. Stanford kampüsündeki bir kreşte üç, dört ve beş yaşındaki çocuklar kendi iradelerini test etmişlerdi. Her bir çocuğa çikolata gibi lezzetli bir yiyecek gösterilecek ve deneyi yapan yetişkinin odayı bir süreliğine terk edeceği söylenecekti. Eğer isterlerse, yiyeceği hemen yiyebilirlerdi. Fakat eğer deneyi icra edenin geri gelmesini beklerlerse bu yiyecekten iki tane alacaklardı.

Çocukların bazıları karşı koyamayarak çikolataları hemen yediler. Ve bazıları da 15 dakikalık sürenin sonuna kadar bekleyerek deneyi yapan kişinin gelmesini beklediler ve kendilerine söz verildiği gibi ikişer tane aldılar. Ancak belki de en ilginç grup bunların arasında kalanlardı. Bir süre beklemeyi başaran fakat daha sonra teslim olarak tatlıyı yiyenler bu gruptaydı.

Çocukların güçlü bir şekilde mücadele ettikleri ve cesurca acı çektikleri bu durumlarda pes etmek ve ekstra çikolatayı kaybetmeleri bir çeşit mantıksızlık olarak yorumlanmıştı. Eğer pes edersen neden eziyet çekmeden başta pes etmiyorsun ki? Ancak bu tamamen, çocukların içinde oldukları duruma bağlıdır. Penn'den Joe McGuire ve Joe Kable, eğer yetişkinlerin odaya geri gelmeden önce geçecek olan zamanın kuvvet yasası dağılımına -uzun süren yoklukların daha uzun bir süre olmayacakları anlamına geldiği- sahipse, o zaman bir kişinin kayıplarını bir noktada kesmesinin oldukça mantıklı olduğuna işaret etmişlerdir.

Diğer bir deyişle tutkulara karşı direnme yeteneği, en azından kısmen, iradeden ziyade bir beklenti sorunudur. Eğer yetişkinlerin kısa gecikmelerden sonra geri geleceklerini düşünürseniz -normal dağılım gibi bir şey- dayanabilirsiniz. Ortalama Kuralı acılı bir bekleyiş sonrası yapılacak şeyin dayanmak olduğunu

ileri sürmektedir. Deneyi yapan kişi artık her an geri gelebilir. Fakat yetişkinlerin odada bulunmaması hakkında zaman ölçeği bakımından hiçbir şey bilmiyorsanız -bir kuvvet yasası dağılımıyla tutarlı bir şekilde- çok zorlu bir savaşı karşı karşıya kalırsınız. Çarpım Kuralına göre uzatmalı bir beklemenin ardından gelecek olan daha uzun bir bekleme süresi olacaktır.

Walter Mischel ve meslektaşları orijinal “Marshmallow Testinin” üzerinden onlarca yıl geçtikten sonra geriye dönüp deneye katılanların hayatlarında neler yaptıklarına baktılar. İki tatlı için bekleyen çocukların şaşırtıcı bir şekilde, SAT puanı gibi nicel ölçütlerle bakıldığında diğerlerinden daha başarılı genç yetişkinler olduklarını gördüler. Eğer “Marshmallow Testi” bir irade testi ise kendini kontrol etmenin bir kişinin yaşamı üzerinde etkisini gösteren güçlü bir araçtır. Lakin test iradeden çok beklentilerle ilgiliyse o zaman bize farklı ve belki de daha dokunaklı bir hikâye anlatmaktadır.

Rochester Üniversitesi’ndeki bir grup araştırmacı eski tecrübelerin Marshmallow Testindeki davranışları nasıl etkileyebileceğini araştırdı. Çikolatayla deneye başlamadan önce aynı çocuklara resim yapacakları söylendi. Deneyi icra eden kişiler onlara boya kalemi ile resim kâğıdı verdiler ve daha iyi resim malzemeleri getireceklerini söyleyip sınıftan çıktılar. Çocuklar kendilerine söylenmeden ikiye bölünmüştü ve bir grupta deneyi icra eden kişi güvenilirli, daha iyi resim malzemeleriyle söz verdiği gibi geri geldi. Diğer tarafta ise deneyi icra eden kişi güvenilirmez olduğunu göstererek elinde özürden başka hiçbir şey olmadan geri geldi.

Resim deneyi tamamlandı ve çocuklar standart Marshmallow Testine geçti. Ve bir önceki deneyde deneyi yapan kişinin güvenilirmez olduğunu öğrenen çocuklar, ikinci bir çikolata şanslarını kaybederek o geri gelmeden önce çikolatayı yemeye daha meyilliydiler.

Marshmallow Testinden kalmak -ve daha sonraki yaşamlarında daha az başarılı olmak- irade eksikliğiyle ilgili olmayabilir. Yetişkinlerin güvenilmez olduğuna inanmanın bir sonucu olabilir: Sözlerini tutmaları konusunda onlara güvenilemeyeceği için, uzunca süreler boyunca ortadan kayboldukları için. Kendini kontrol etmeyi öğrenmek önemlidir fakat yetişkinlerin sürekli olarak yanlarında olduğu ve güvenilir oldukları bir ortamda büyümek de o kadar önemlidir.

Mekanik Yeniden Üretim Zamanındaki Öncüller

Tıpkı bir insanın, yazdıklarının doğru olduğuna kendini inandırması için aynı gazeteden birkaç kopya alması gibi.

—Ludwig WITTGENSTEIN

Ne okuduğu konusunda dikkatlidir çünkü yazacaklarını oradan alacaktır. Ne öğrendiği konusunda dikkatlidir çünkü bileceği şeyler onlar olacaktır.

—Annie DILLARD

Bayes Kuralının bizlere gösterdiği gibi iyi tahminlerde bulunmanın en iyi yolu tahmin yapmakta olduğunuz şey hakkında tam bilgi sahibi olmaktır. İnsan yaşamları hakkında tahminde bulunurken iyi bir iş çıkarmamızın fakat firavunların hükümdarlık süreleri sorulduğunda kötü performans sergilememizin nedeni budur.

Bayes Kuralına iyi bir şekilde uymak, dünyayı gerçek oranlarda temsil etmek anlamına gelir: İyi, uygun şekilde ayarlanmış öncülleri olmak. Genellikle insanlar ve hayvanlar için bu durum doğal olarak gerçekleşmektedir; bir kural olarak bir şey bizi şaşırttığında bizi şaşırtması gerekir ve şaşırtmadığında da şaşırtmaması. Objektif olarak doğru olmayan ön yargıları biriktirsek bile bunlar, genellikle dünyanın yaşadığımız belirli bir bölümünü

yansıtma makul bir iş çıkarırlar. Örneğin çöl ikliminde yaşayan biri dünyadaki kum miktarını aşırı derecede fazla olarak tahmin edebilir ve kutuplarda yaşayan biri de kar miktarını fazla bir şekilde tahmin edebilir. Her ikisi de kendi ekolojik konumlarına iyi uyum sağlamışlardır.

Ancak her şey bir tür dil öğrendiğinde dağılmaya başlar. Konuştuğumuz şeyler tecrübe ettiğimiz şeyler değildir. Çoğunlukla ilginç şeylerden bahsedersiniz ve bunlar, yaygın olmayan şeyler olma eğilimindedir. Kabaca tanımıyla olaylar, her zaman uygun frekanslarıyla tecrübe edilirler fakat bu durum dil söz konusu olduğunda tamamıyla doğru değildir. Bir yılan ısırtığına maruz kalan ya da yıldırım çarpan herhangi bir kişi yaşamlarının geri kalanı boyunca bu hikâyeleri tekrar tekrar anlatacaklardır. Ve bu hikâyeler o kadar çarpıcı olacaktır ki başkaları tarafından da alınıp anlatılacaktır.

Bu nedenle diğer kişilerle iletişim kurmak ve dünya hakkındaki kesin öncülleri korumak arasında ilginç bir gerilim vardır. İnsanlar kendi ilgilerini çeken şeylerden bahsettiklerinde -ve kendilerini dinleyenlerin ilginç bulacaklarını düşündükleri hikâyeler anlattıklarında- tecrübelerimizin istatistiklerini çarpıtır. Bu da uygun öncül dağılımını muhafaza etmeyi zorlaştırır. Ve bu zorluk yazılı basının, gece haberlerinin ve sosyal medyanın gelişimiyle daha da artmıştır: Türümüzün sözü yaymayı mekanik bir şekilde yapmasına imkân sağlayan yenilikler.

Kaza geçirmiş bir uçak ya da araba görüntüsünü kaç kez gördüğünüzü bir düşünün. Her ikisinden de kabaca aynı sayıda görmüş olmanız muhtemeldir lakin görmüş olduğunuz kaza yapmış arabaların çoğunu oto yolda yanından geçerken, bir başka kıtada kaza yapmış uçakları ise internet ya da televizyonda yayınlanan görüntülerde görmüş olabilirsiniz. Örneğin ABD’de 2000 senesinden bu yana hava yoluyla seyahat edip uçuşlarda yaşamını kaybeden insan sayısı Carnegie Hall salonunun yarısını bile dol-

duracak kadar değildir. Bunun aksine aynı zaman zarfında ABD’de otomobil kazasında ölenlerin sayısı Wyoming’in toplam nüfusundan daha fazladır.

Kısaca belirtmek gerekirse, olayların medyada sunulması dünyadaki gerçekleşme sıklıklarına bağlı değildir. Sosyolog Barry Glassner’in da belirttiği gibi, ABD’deki cinayet oranı 1990’larda yüzde 20 azaldı fakat aynı dönemde Amerikan haberlerinde silahlı şiddet haberlerinin görülme sıklığı *yüzde 600 arttı*.

Eğer içgüdüleri olan iyi bir Bayesçi olmak istiyorsanız, yani eğer hangi tahmin kuralının uygun olduğunu düşünmek zorunda kalmadan doğal bir şekilde iyi tahminlerde bulunmak istiyorsanız; öncüllerinizi muhafaza etmeniz gerekir. Bu da mantığa aykırı düşecek şekilde haberleri izlememeniz anlamına gelebilir.

Fazla Uyum Sağlama (Overfitting)

Ne Zaman Daha Az Düşünmeli

Charles Darwin kuzeni, Emma Wedgwood’a evlilik teklif edip etmemesi gerektiğine karar vermeye çalışırken eline bir kâğıt-kalem aldı ve muhtemel tüm sonuçları ağırlıklandırdı. Evliliğin olumlu yanlarına çocuk sahibi olmayı, hayat arkadaşlığını ve “kadın&müzik ile sohbeti” sıraladı. Olumsuz yanlar arasında ise “korkunç zaman kaybı”, istediği her yere gidebilme özgürlüğünün kaybolması, akraba ziyaretlerine gitme zorunluluğunun getirdiği yük, çocukların sebep olduğu masraflar ve endişe duygusu, “eşim ya Londra’yı sevmezse?” endişesi ve kitaplara harcanacak daha az parası olması yer almaktaydı. İki sütunun ağırlıklarının birbiriyle karşılaştırılması sonucunda çok az farkla alternatiflerden biri galip gelmişti. Darwin kâğıdın en altına “Evlen-Evlen-Evlen Q.E.D.” (Quod erat demonstrandum. Darwin daha sonra bu ifadeyi ‘Evlenmenin gerekli olduğu kanıtlandı’ olarak yeniden ifade etmişti) diye karalamıştı.

Bir alternatifin artıları ve eksilerinden oluşan listeleme tekniği Darwin döneminde zaten uzun zamandır kullanılan bir algoritmaydı ve bir asır kadar önce Benjamin Franklin tarafından geliştirilmişti. Franklin “bizi şaşkına çeviren belirsizliğin” üstesinden gelmek adına şunları yazmıştı:

Benim yöntemim, bir sayfanın yarısını bir çizgiyle iki sütuna bölmek, bunlardan birinin üstüne Artılar, diğerine ise Eksiler yazmaktır. Daha sonra üç ya da dört günlük değerlendirme süresinde, farklı zamanlarda ortaya çıkan olumlu ya da olumsuz yanları bu başlıklar altına yerleştiririm. Daha sonra ise bir görüş altında hepsini topladığımda bunların her birinin kendine has ağırlıklarını hesaplarım. Burada her iki tarafta birbirine eşit olanları gördüğümde üzerini çizerim. Eğer artılar tarafındaki bir özelliğin eksiler tarafındaki iki özelliğin ağırlığına eşit olduğuna kanaat getirirsem o zaman üçünün de üstünü çizerim. Eğer üç tane eksi özelliğin iki tane artı özelliğe eşit olduğunu tespit edersem o zaman beşini listenin dışına atarım ve böylece en sonunda sonucu görürüm. Eğer 1-2 günlük ilave değerlendirme sonucunda önemli yeni bir şey ortaya çıkmazsa o zaman uygun bir karara varmış olurum.

Franklin bunu bir çeşit hesaplama olarak düşünmüştü ve şöyle demişti: “Bu tarz bir denklemden, ahlaki ya da sağduyulu cebir denebilecek çok büyük avantaj elde ettim.”

Düşünme hakkında kafa yordüğümüzda daha fazla düşünmenin daha iyi olduğunu varsaymak kolaydır. Ne kadar fazla artı ve eksi sıralarsak o kadar iyi bir karar veririz, bir hisse senediyle ilgili ne kadar çok faktörü sıralarsak o kadar iyi bir tahminde bulunuruz, bir raporun üzerinde ne kadar fazla çalışırsak o kadar iyi bir rapor hazırlamış oluruz. Franklin’in sisteminin ardında yatan kesinlikle bu düşüncedir. Bu bakımdan, Darwin’in evliliğe olan “cebirsel” yaklaşımı açıkça ortada olan tüm garipliğine rağmen dikkat çekici, hatta takdire şayan bir şekilde akla yatkındır.

Ancak Franklin ya da Darwin makine öğrenme -bilgisayarlara geçmiş tecrübelerden iyi muhakeme yapmayı öğretme bilimi-döneminde yaşamış olsaydı Ahlaki Cebirin köklerinden sallan-

makta olduğuna şahit olurlardı. Ne kadar fazla kafa patlatılması ve kaç tane faktörün göz önüne alınması gerektiği soruları, istatistikçi ve matematikçilerin “aşırı derecede uyumlandırma” olarak adlandırdıkları karmaşık problemin kalbinde yer almaktadır. Ve bu problemle uğraşmak, bilinçli bir şekilde *daha az düşünmekte* bir bilgelik olduğunu açığa çıkarmaktadır. Bunun (aşırı derecede uyumlandırma) farkında olmak pazara, yemek masasına, spor salonuna ve nikah masasına olan yaklaşımımızı değiştirir.

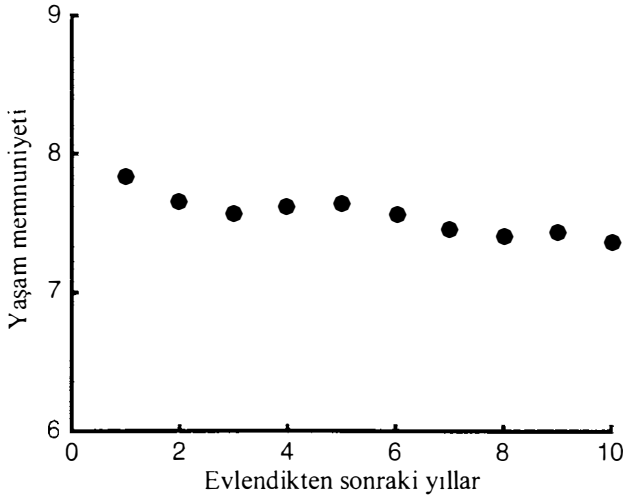
Karmaşıklığın Karşıtı Durum

Senin yapabildiğin bir şeyi senden daha iyi yaparım, herhangi bir şeyi senden daha iyi yapabilirim.

—ANNIE GET YOUR GUN

Her bir karar bir çeşit tahminde bulunmaktır. Henüz denememiş olduğunuz bir şeyden ne kadar hoşlanacağınız, bir eğilimin ne istikamette gideceği ya da daha az tercih edilen bir yolun nasıl başarıya ulaşacağı hakkında tahminde bulunuruz. Ve her bir tahmin, çok önemli bir şekilde iki ayrı şey hakkında düşünme eylemini içerir: Neyi bildiğiniz ve neyi bilmediğiniz. Yani bu, şu ana kadar edindiğiniz tecrübeler ve tahminde bulunmakta olduğunuz gelecekte yaşayacaklarınızın tümü için geçerli bir teori oluşturmak maksatlı bir denemedir. İyi bir teori elbette ki her ikisi için de geçerli olacaktır. Fakat yapılan her bir tahminin aslında bu iki görevi gerçekleştirmek zorunda olması, aynı zamanda kaçınılmaz bir gerilime neden olmaktadır.

Bu gerilimin bir gösterimi olması açısından Darwin ile ilişkili olabilecek bir veri setine göz atalım. Almanya’da son zamanlarda gerçekleştirilen ve insanların evliliklerinin ilk on yılındaki yaşam memnuniyet seviyeleri üzerine yapılan bir çalışmayı inceleyelim. Bu grafikteki her nokta çalışmanın kendisinden alınmış-

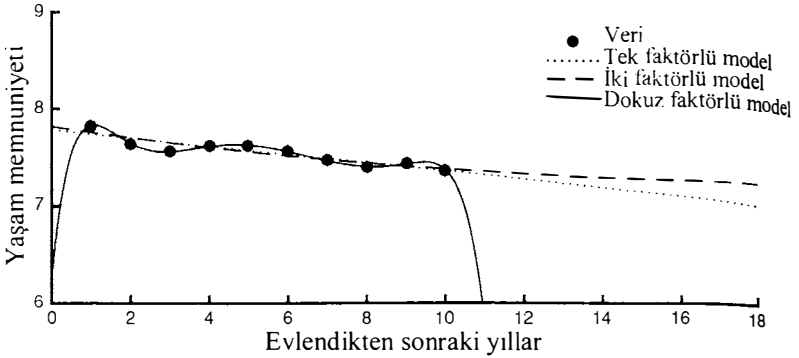


Evlilikten itibaren olan yaşam memnuniyetinin zamana bağlı bir fonksiyonu olarak gösterimi

tır. Burada amacımız ise bu noktalara uyan bir çizgi formüle etmek ve bunu geleceğe doğru yayarak 10 yıldan daha ilerisi için tahminde bulunmaktır.

Bunun için olası formüllerden biri yaşam memnuniyetini tahmin için sadece bir faktörü kullanmak olurdu: Evlilikte geçen zaman. Bu, çizelgede dümdüz bir çizgi oluşmasını sağlardı. Bir diğer olası yaklaşım ise iki faktör, zaman ve zamanının karesini kullanmaktır ve bunun sonucunda U şekline parabolik bir eğri oluşur ve bu da zaman ile mutluluk arasında muhtemelen daha karmaşık bir ilişki ortaya koyar. Ve eğer formülü daha fazla faktörü içerecek şekilde genişletecek olursak (zamanın küpü gibi), ortaya çıkacak olan çizginin eğilip büküldüğü daha fazla nokta olacaktır. Dokuz faktörlü bir formüle geldiğimizde çok daha karmaşık ilişkiler elde ederiz.

Matematiksel açıdan bakacak olursak iki faktörlü modelimiz, tek faktörlü modelde yer alan tüm bilgileri bünyesinde barındırır ve kullanabileceğimiz ilave terim içerir. Benzer şekilde dokuz



Çeşitli faktör sayısına sahip değişik modeller ile yaşam memnuniyetinin tahmini

faktörlü model iki faktörlüde mevcut tüm bilgileri ve daha fazlasını sağlamaktadır. Bu mantıkla bakıldığında dokuz faktörlü modelin her zaman bize en iyi tahminleri sunması gerekmektedir.

Fakat her şey görüldüğü gibi değildir.

Bu modellerin veri setine uygulanmış şekli yukarıda görülmektedir. Tek faktörlü model, tam da beklendiği şekilde birçok gerçek noktaya temas etmeden geçmekte ancak temel eğilimi yakalamaktadır: Cicim aylarından sonra bir düşüş. Bu modelin düz çizgisi bize bu azalmanın sonsuza kadar süreceği ve en nihayetinde sonsuz bir mutsuzlukla sonlanacağı tahmininde bulunmaktadır. Bu tahminde yanlış bir şeyler vardır. İki faktörlü model veri setine uyum açısından daha yakındır ve eğri şekli daha farklı bir gelecek tahmininde bulunmakta, yaşam memnuniyet seviyesindeki ilk düşüşten sonra zaman içerisinde hemen hemen aynı düzeyde seyredeceğini ön görmektedir. Son olarak dokuz faktörlü model grafikteki her bir veri noktasından geçmektedir ve aslında çalışmadaki tüm veri seti için kusursuz uyumlu bir modeldir.

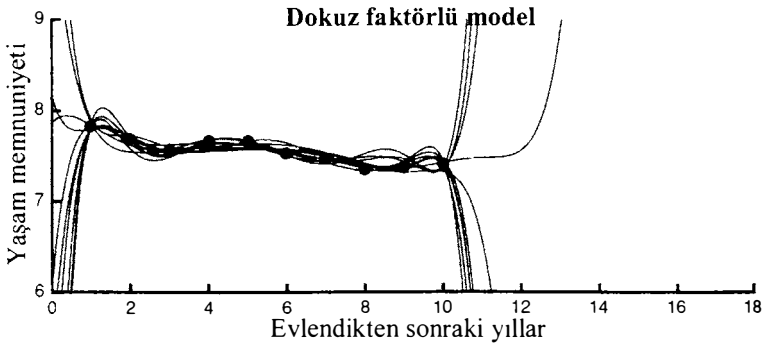
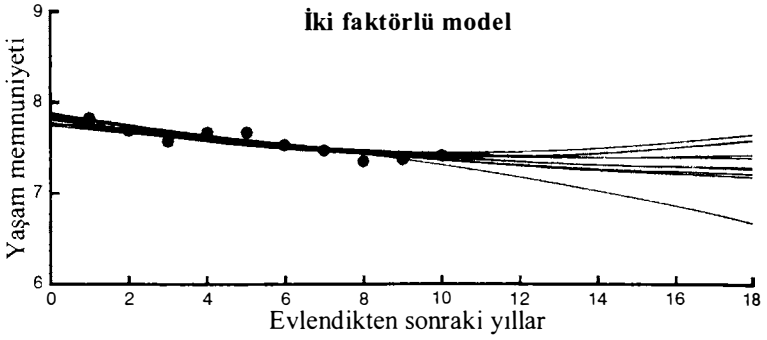
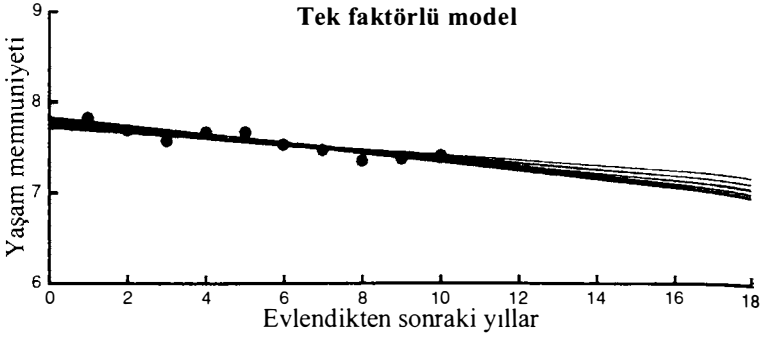
Bu bakımdan dokuz faktörlü model elimizdeki en iyi model gibi görünmektedir. Çalışmaya dâhil edilmemiş yıllar için yapılan tahminlere bakacak olursanız, ne kadar kullanışlı olduğunu

merak edersiniz. Daha düğün gününde üzüntü öngörmekte, evlilikte birkaç ay geçtikten sonra saçma bir yükseliş gözlenmekte, inişli çıkışlı bir seyir sonrası onuncu yılın ardından çok keskin bir düşüş gözlenmektedir. Bunun aksine iki faktörlü model tarafından öngörülen dengeli bir seviye, evlilik ve mutluluk konusunda psikolog ve ekonomi uzmanlarının söyledikleriyle en tutarlı tahmindir. (Bu kişiler evliliğin kendisiyle ilişkili olan bir mutsuzluktan ziyade, rastlantısal bir şekilde normalliğe -insanların yaşamlarındaki temel memnuniyet düzeyine- dönüşü gösterdiğine inanmaktadır.)

Buradan almamız gereken ders şudur: Teorik olarak, bir modele daha fazla faktör ilave etmenin elimizdeki mevcut veri setine her zaman daha iyi uyum sağlayacağı doğrudur. Lakin mevcut verilere daha iyi uyum, her zaman daha iyi bir tahmin anlamına gelmek zorunda değildir.

Diyelim ki aşırı basit bir model -örneğin tek faktörlü bir modelin düz çizgisi- verinin temel şeklini yakalamada başarısız olabilir. Eğer gerçek durum bir eğri gibi görünüyorsa, hiçbir düz çizgi bunu düzgün bir şekilde ifade edemez. Diğer taraftan, dokuz faktörlü örneğimiz gibi aşırı derecede karmaşık olan bir model, yine bizim örneğimizde gördüğümüz gibi veri noktalarına karşı aşırı hassastır. Sonuç olarak bu modelin ürettiği çözümler, bu veri setine özellikle uyacak şekilde ayarlanması sebebiyle oldukça değişkendir. Eğer çalışma farklı kişiler ile aynı esas şablon üzerinde küçük farklar oluşturacak şekilde tekrarlanırsa, bir ve iki faktörlü modeller üç aşağı beş yukarı sabit kalacaktır fakat dokuz faktörlü model çalışmadaki bir veri noktasından diğerine büyük değişiklikler eşliğinde hareket edebilecektir. Bu durum, istatistikçilerin *fazla uyum sağlama* dedikleri durumdur.

Bu nedenle makine öğrenmesinin en derin gerçekliklerinden biri de aslında daha fazla sayıda faktörü göz önüne alan daha karmaşık bir model kullanmanın her zaman daha iyi olmadığıdır.



Verilere az sayıda rassal “gürültü” (farklı kişilerle araştırmayı yinelemenin etkilerini simüle etmek) eklemek, bir ve iki faktörlü modeller nispeten çok daha istikrarlı kalırken, dokuz faktörlü modelde büyük dalgalanmalar meydana getirmektedir.

Ayrıca sorun sadece ekstra faktörlerin büyük değişikliklere neden olması değil, aynı zamanda ilave olan karmaşıklığa değecek kadar da iyi performans göstermiyor olmasıdır. Hatta bu modeller tahminlerimizi oldukça fazla bir şekilde kötüleştirebilir de.

Veriye Tapma

Eğer elimizde kusursuz bir şekilde temsil özelliği olan bir örneklemden çekilen, tamamen hatasız ve değerlendirmeye çalıştığımız şeyi tam olarak temsil eden bol miktarda veri var ise mümkün olan en karmaşık modeli kullanmak aslında en iyi yaklaşım olacaktır. Fakat eğer bu faktörlerden herhangi biri geçerli olmadığı durumda modelimizi kusursuz bir şekilde veriye uydurmaya çalışacak olursak o zaman fazla uyum sağlama riskiyle karşı karşıya kalırız.

Diğer bir deyişle fazla uyum sağlama, gürültü ya da yanlış ölçümle uğraştığımız her durumda bizim için bir tehlike arz eder ve her zaman aslında bunlarla uğraşmaktayız. Veriyi toplama şeklimizde ya da bunların raporlanma şeklinde hatalar olabilir. Bazen insanların mutluluğu gibi araştırılmakta olan konular bırakın ölçmeyi, tanımlamak için bile oldukça zordur. Mevcut en karmaşık modeller esnekliklerinden dolayı veride mevcut herhangi bir şablona uyabilir fakat bu aynı zamanda bu şablonlar gürültülerden kaynaklanan serap ya da hayaletler olduğunda da onlara uyabileceği anlamına da gelir.

Tarih boyunca dini metinler, inanan insanları bir konuda uyarmıştır: Putlara, heykellere, tablolara ve diğer somut nesnelere tapmamaları konusunda. Örneğin İlk Emir “cennette olan bir şeyin oymasına ya da buna benzer herhangi bir şeye” boyun eğmeye karşı uyarıda bulunmaktadır. Ve Krallar Kitabı’nda Tanrı’nın emriyle yapılan bronz bir yılan, Tanrı yerine tapınma ve tütsü yakma nesnesine dönüşmektedir. Fazla uyum sağlama te-

mel olarak bir nevi veriye tapmadır ve neyin önemli olduğundan ziyade, neyi ölçebildiğimize odaklanmamızın sonucudur.

Elimizdeki veri ve istediğimiz tahminler arasında mevcut olan bu boşluk aslında her yerde mevcuttur. Büyük bir karar verirken, bizim için şimdi önemli olan faktörleri düşünerek sadece ileride bizi mutlu edecek şeyleri tahmin edebiliriz. (Harvard'dan Daniel Gilbert'in de belirttiği gibi, "gelecekteki bizler genellikle, yaptırmak için iyi para ödediğimiz dövmeleri çıkarmak için iyi para ödüyoruz.") Finansal bir tahminde bulunurken bir hisse senedinin gelecekte sahip olabileceği değil, sadece geçmişteki değeriyle ilişkili olan şeylere bakabiliyoruz. Günlük küçük eylemlerinizi bile bu geçerlidir. Bir e-posta yazarken alıcının anlayışını tahmin için kendimizinkini göz önüne alırız. Kendi yaşamlarımızdaki veriler her zaman gürültülü olduğu için halk arasında yapılan araştırmalar gerçekten önem verdiğimiz şeyler için en iyi ihtimalle birer ölçüt olmaktadır.

Sonuç olarak, daha fazla faktörü göz önüne almak ve bunları modellemek için çabalarımızı daha da genişletmek bizi yanlış şeyi optimize etme -dua edenlere gerçek ilahi güç yerine bronz yılanı sunmak gibi- hatasına sürükleyebilir.

Fazla Uyum Sağlama Her Yerde

Fazla uyum sağlamayı bir kere öğrendiniz mi, onu etrafınızda her yerde görürsünüz.

Örneğin fazla uyum sağlama, damak tatlarımızdaki ironiyi açıklar. Genellikle tadı en çok hoşumuza giden şeyler, genel olarak tat alıcılarımızın bizim için kötü olan şeyleri yememize engel olması gerekirken, nasıl olur da sağlığımız açısından genellikle kötü olarak görülür?

Bu sorunun cevabı tadın sağlık açısından vücudumuzun yaklaşıklık bir ölçüsü olmasıdır. Yağ, şeker ve tuz önemli besinlerdir

ve birkaç bin yıl boyunca bunları içeren yiyecekleri içeren gıdalar tüketmek düzgün bir diyet için ölçüt olarak görülürdü.

Ancak mevcut gıdaları değiştirebilme yeteneği bu ilişkiyi bozmuştur. Şimdilerde bizim için faydalı olandan daha fazla yağ ve şekerli gıdalara ekleyebilmekteyiz ve bunları eskiden insanların diyetini oluşturmuş olan sebzeler, tahıllar ve et ürünlerinden oluşan dengeli karışıma nazaran daha fazla tüketmekteyiz. Diğer bir deyişle, damak tadımıza aşırı derecede uyum sağlayabilmekteyiz. Ve yiyeceklerle yetenekli bir şekilde ne kadar fazla oynarsak (ve yaşam sitillerimiz atalarımızınkilerden daha da fazla sap-tıkça), tat almamız o kadar da kusurlu bir ölçüt hâlini alır. Bu insani özelliğimiz bir lanete dönüşmekte, bizi tam olarak doğru şeyi istemediğimizde bile tehlikeli bir şekilde bunu elde edebilecek bir konuma taşımaktadır.

YALNIZ DİKKAT EDİN: Tüm o şekerli yiyeceklerden aldığınız fazla kilolarınızdan kurtulmak için spor salonuna gittiğinizde fitness konusuna da fazla uyum sağlama sergileyebilirsiniz. Fitnessın gözlenebilir bazı belirtilerini -örneğin düşük yağ oranı ve yüksek kas oranı- ölçmek kolaydır ve kalp rahatsızlıkları ve diğer bazı hastalıkların riskini azaltmak konusunda faydalıdır. Fakat bunlar aynı zamanda kusursuz olmayan ölçüm araçlarıdır. Bu işaretlere aşırı derecede uyum sağlamak -örneğin düşük vücut yağ oranı için çok aşırı bir diyet uygulamak ya da kas kütlesini artırmak için steroid kullanmak gibi- sizi sağlıklı bir görünüme ulaştırabilir ancak, sadece görünüme ulaştırır.

Fazla uyum sağlamak sporda da görülmektedir. Örneğin Tom, bazı dönemlerde ara vermesine rağmen gençliğinden bu yana eskrim ile ilgilenmiştir. Eskrimin orijinal amacı insanlara kendilerini bir düelloda nasıl savunacaklarını öğretmekti (savunma kelimesinin İngilizcesi olan “defence” kelimesi bu nedenle, eskrimin İngilizce karşılığı olan ‘fence’ kökünden gelmektedir). Ve modern eskrimde kullanılmakta olan silahlar da

bu çeşit karşılaşmalar için yapılan hazırlıklarda kullanılanlara çok benzemektedir. (Bu durum, 50 yıldan daha yakın bire süre öncesine kadar resmi düellolarda kullanılan için özellikle geçerli bir gerçektir.) Lakin elektronik skor donanımının (bir vuruşu kayıt altına alan, kılıcın ucundaki bir düğme) gelişi, bu sporun doğasını değiştirdi ve ciddi bir düelloda sizin işinize pek yaramayacak olan teknikler müsabakalar için çok önemli bir hâl aldı. Modern eskrimciler sadece puan almalarını sağlayacak sertlikte olan esnek kılıçlar kullanmaktadırlar. Sonuç olarak birbirlerini kesmekten ya da kılıçlamaktan ziyade birbirlerine metal kamçılar savuruyor gibi görünmektedirler. Bir spor olarak her zaman heyecan verici olmuştur fakat sporcular taktiklerini puan sistemine aşırı uydurdukça gerçek bir kılıç kullanıcılığı yönündeki yetenekleri daha az faydalı bir hâl almaktadır.

Ancak fazla uyum sağlama, muhtemelen iş dünyasından başka hiçbir alanda güçlü ya da rahatsız edici olmamıştır. Steve Jobs bu konuyla ilgili şunları dile getirmiştir: “Teşvik edici ve yönlendirici yapılar işe yaramaktadır, bu nedenle insanları neye teşvik ettiğiniz konusunda dikkatli olmalısınız çünkü farklı teşvik mekanizmaları tahmin bile edemeyeceğiniz türden sonuç yaratır.” Girişim şirketlerine destek kuruluşu olan Y Combination’ın Başkanı Sam Altman Jobs’ın dikkat edilmesi konusundaki sözlerini şu kelimelerle yeniden ifade etmektedir: “Şirketin, CEO neyi ölçmek isterse onu üreteceği doğrudur.”

Aslında, aynı türden ters etkileri olmayan teşvik ya da ölçütler üretmek inanılmaz derecede güçtür. 1950’lerde Cornell Üniversitesi’nden İşletme Bölümü öğretim elemanı V. F. Ridgway, bu tarz bir dizi “Performans Ölçümlerinin Fonksiyonel Olmayan Sonuçlarını” katalog hâline getirdi. Bir iş bulma kurumunda çalışanlar icra ettikleri görüşme sayısına göre değerlendirilmekteydi ve bu durum, görüşmeleri mümkün olduğunca kısa bir sürede (müşterilerine iş bulma konusunda yardımcı olmadan) tamamlama-

maları yönünde motive etmekteydi. Bir kanun kuruluşunda ise müfettişlere aylık performans kotaları verilmekteydi ve onlar da bu nedenle ay sonlarında acil olan vakalar yerine daha kolay olan vakaları seçmekteydi. Ve bir fabrikada üretim ölçütlerine odaklanmak yöneticileri bakım onarım işlerini göz ardı etmelerine ve geleceklerinde olacak bir faciaya neden olmalarına sebep olmuştu. Bu tarz problemler yönetimin hedeflerini yakalamak uğruna basit hatalar olarak göz ardı edilemez. Aslında bunlar tam tersidir: Yanlış şeyin acımasız ve zekice optimize edilmesi.

21'inci yüzyıldaki gerçek zamanlı ölçümlere doğru olan değişim, ölçütlerin ortaya koyduğu tehlikeyi sadece daha şiddetli bir hâle getirmişti. Google'daki dijital pazarlama uzmanı Avinash Kaushik, web sayfaları kullanıcılarının mümkün olan en fazla sayıdaki reklamı görmelerini sağlamaya çalışmanın, sitelerin reklamlarla dolmasına neden olduğu konusunda uyarmaktadır: "Size 1.000 reklam görüntülenmesi başına para ödendiğinde buradaki teşvik, her bir sayfada mümkün olan en fazla sayıda reklamı göstermek ve ayrıca müşterinin sitede en fazla sayıda sayfayı ziyaret etmesini sağlamak olacaktır." Web sitesi kısa vadede biraz daha para kazanabilir fakat reklamlarla dolup taşan yazılar, yavaş yüklenen çok sayfalı slide showlar ve de sansasyonel başlıklar uzun vadede okuyucuları kendinden uzaklaştıracaktır. Kaushik sonuç bölümünde şunları söylemektedir: "Dostlar, dostlarının sayfa görüntülenme oranlarını ölçmesine izin vermez. Asla."

Bazı durumlarda bir model ve gerçek dünya arasındaki fark kelimenin tam anlamıyla ölüm kalım meselesi olmaktadır. Örneğin orduda ve kolluk kuvvetlerinde sürekli tekrara ve ezbere dayalı askeri eğitimin çatışma anında gerekli olacak yeteneklerin edinilmesinde önemli olduğu düşünülür. Burada amaç, belirli hareket ve taktiklerin tamamen otomatik hâle gelene kadar eğitimi yapmaktır. Fakat işin içine fazla uyum sağlama girdiği an-

da, sonuç felaket olabilir. Örneğin bir çatışma sırasında iyi bir hedef teşkil edecek şekilde mermilerin boş kovanlarını ceplerine dolduran polis memurlarını anlatan hikâyeler mevcuttur. Kara Kuvvetlerinde eskiden komando birliklerinde görev yapmış ve West Point'te psikoloji derslerine girmiş Dave Grossman'ın da belirttiği gibi, “Birçok gerçek çatışmada ortalıktaki toz duman yatıştığında memurlar ceplerinde nereden geldiklerini hatırlamadıkları boş kovanları bulduklarında şok olmaktadır. Bazen ellerinde boş kovanlar olan hayatını kaybetmiş polis memurları bulunmaktadır ve bu eğitim onların içine işlediği için bu hâle düşmüşlerdir.” FBI da benzer şekilde, ajanlarının iki el ateş ettikten sonra mermilerin hedefe isabet edip etmediğinin ya da hâlen bir tehdit var olup olmadığının bir önemi olmaksızın refleks olarak silahlarını kılıflarına yerleştirdiğini -eğitimdeki standart bir uygulama- gördükten sonra eğitim programını değiştirmek zorunda kalmıştı. Buna benzer hatalar kolluk kuvvetleri ve orduda “eğitim zayıyatı” olarak bilinir ve bir kişinin kendi hazırlık durumuna fazla uyum sağlayabileceğinin de kanıtıdır. Özellikle acı olan bir örnekte, bir polis memuru içgüdüsel olarak bir saldırganın silahını elinden kapmış ve daha sonra yine içgüdüsel olarak geri vermişti; tıpkı eğitimlerde defalarca hocalarıyla birlikte yaptıkları gibi.

Fazla Uyum Sağlamayı Tespit Etmek:

Çapraz Doğrulama (Cross Validation)

Fazla uyum sağlama kendisini en başlarda mevcut veriye kusursuz şekilde uyan bir teori olarak gösterdiğinden, bunu tespit etmesi oldukça zordur. Gerçekten iyi olan bir modelle fazla uyum sağlamadaki bir model arasındaki farkı nasıl söyleyebiliriz? Bir okulda konu hakkında mükemmelleşen bir sınıf öğrenci ile sadece “sınava hazırlanan” bir sınıfı nasıl ayırt edebiliriz? İş dünya-

sında, gerçekten çok iyi performansa sahip bir çalışanı, zeki bir şekilde kendisini sadece şirketin önemli performans göstergelerinde ya da patronun algısında iyi gösterme konusuna uyum sağlamış birinden nasıl ayırt edebiliriz?

Bu senaryoları didik didik incelemek aslında oldukça zordur fakat imkânsız değildir. Makine öğrenme üzerine araştırmalar fazla uyum sağlamayı tespit etmek için çeşitli somut stratejiler doğurmuştur ve bunların en önemlilerinden biri **Çapraz Doğrulama**dır.

Kısaca ifade etmek gerekirse Çapraz Doğrulama, bir modelin sadece elindeki veriye ne kadar iyi uyduğunu değil, aynı zamanda henüz görmediği bir veriye ne kadar iyi genelleme yapabildiğini değerlendirme anlamına gelir. Bu durum, mantığa aykırı bir şekilde *daha az* veri kullanmayı da içerebilmektedir. Evlilik örneğinde, diyelim ki rastgele iki veri noktasını “seçip” diğer sekiz veri noktasıyla modeller uygulayabiliriz. Seçilen bu iki veri noktası tehlikenin habercisidir. Eğer karmaşık bir model sekiz veriyi tam olarak alır ve diğer iki veriyi es geçerse, fazla uyum sağlamanın mevcudiyet ihtimali yüksektir.

Mevcut bazı verileri bu iş için seçmenin yanı sıra, modeli tamamen farklı bir şekilde değerlendirmeden elde edilen bir veriyle test etmek de faydalıdır. Daha önce görmüş olduğumuz gibi, bazı ölçütleri temsili olarak kullanmak da -beslenme konusunda tat almanın kullanılması gibi- fazla uyum sağlamaya neden olabilir. Bu gibi durumlarda kullanmakta olduğumuz birincil performans ölçümünü diğer mümkün ölçüm çeşitleriyle çapraz olarak doğrulamamız gerekir.

Örneğin okullarda standart testler, birçok fayda sağlamaktadır. Binlerce sayfa sınav kâğıdı maliyeti daha düşük ve hızlı olarak okunabilir. Okullar bu testlerin yanı sıra öğrencilerin küçük bir kısmını -örneğin her sınıftan bir kişi ya da yüz öğrenciden biri gibi- farklı bir değerlendirme metodu (bir makale yazılması

ya da sözlü sınav gibi) kullanarak değerlendirebilirler. (Sadece birkaç öğrenci bu şekilde sınava tabi tutulacağı için ölçek ekonomisi maliyetleri hakkında endişelenmeye gerek yoktur.) Standart testler hızlı bir geri besleme sağlayacaktır -örneğin her hafta öğrencilerinize bilgisayar destekli bir sınav yapabilir ve sınıfın ilerleme durumunu neredeyse gerçek zamanlı olarak takip edebilirsiniz- ve bu arada ikincil veri seti çapraz doğrulama için kullanılabilir. Öğrencilerin sadece testlerde daha iyi not alması için değil, standart testlerin ölçmesi beklenen bilgiyi gerçekten öğrendiğinden emin olmak için böyle yapılır. Eğer bir okulun standart test notları yükselirken “standart olmayan” performansı ters istikamette ilerliyorsa o zaman okul idarecilerinin “test için öğrenme alışkanlığının yerleşmiş olduğuna” ve öğrencilerin yeteneklerinin testin kendisine aşırı derecede uyum sağladığına dair bir uyarı tabelasıyla karşılaşması gerekir.

Çapraz doğrulama aynı zamanda eğitim sürecinin kazandırdığı alışkanlıkları tırpanlamadan iyi refleks kazanmaya çalışan ordu ve kolluk kuvvetleri personeli için de bir yol sunar. Tıpkı sözlü sınavların ve makale yazmanın standart testleri doğrulaması gibi ara sıra icra edilen alışılmışın dışındaki “çapraz eğitim” değerlendirmeleri, alışılmadık görevler için reaksiyon süresi ile atış başarı yüzdelerinin ölçümü ve genellenmesi için kullanılabilir. Eğer bunlar genele uymuyorsa bu durum eğitim sisteminde bir değişikliğe gitmek için kuvvetli bir işaret demektir. Hiçbir eğitim bir kişiyi gerçek bir savaş için tam olarak hazırlayamasa da, en azından bunun gibi egzersizler “eğitim zayıatları” oluşmadan önce uyarı sağlayabilir.

Fazla Uyum Sağlamayla Nasıl Mücadele Edilir: Karmaşıklığı Cezalandırmak

Eğer bir şeyi basitçe açıklayamıyorsan, onu yeteri kadar iyi anlamamışsın demektir.

—Anonim

Fazla uyum sağlamanın kendisini gösterdiği bazı durumları gördük ve bunu tespit etmek için bazı yöntemleri inceledik. Peki bunu ortadan kaldırmak için gerçekte ne yapabiliriz?

İstatistiksel açıdan bakacak olursak fazla uyum sağlama, görmüş olduğumuz veri setine karşı aşırı hassas olmanın bir göstergesidir. Bu nedenle çözüm çok basittir. İyi bir uyum bulma arzumuz ile bunu yapmak için kullandığımız modellerin karmaşıklığını dengelersek bu işi halletmiş oluruz.

Birbiriyle yarışan modeller arasında seçim yapmanın bir yolu, her şeyin birbirine eşit olduğu bir ortamda en basit açıklamanın doğruya en yakın olduğunu ileri süren Occam'ın Usturası (Occam's Razor) prensibidir. Elbette her şeyin tamamen eşit olması nadir karşılaşılan bir durumdur; bu nedenle de Occam'ın Usturası gibi bir şeyin matematik bağlamında nasıl uygulanacağı hemen anlaşılacak şekilde ortada değildir. 1960'larda bunun üzerine çalışan Rus Matematikçi Andrey Tikhonov, buna bir cevap önermişti. Daha karmaşık çözümleri cezalandıran ilave bir terimi hesaplamalarınıza dâhil edin. Eğer bir karmaşıklık cezası ilave edersek, o zaman daha karmaşık modellerin sadece iyi bir iş çıkarması yetmez, aynı zamanda veriyi açıklamada kendi büyük karmaşıklıklarını haklı çıkaracak kadar *önemli derecede* iyi iş çıkarmaları gerekecektir. Bilgisayar mühendisleri bu prensibe-karmaşıklıkları için modelleri cezalandıran kısıtların kullanılması- **düzenleştirme (regularization)** demektedir.

Peki bu karmaşıklık cezaları neye benzemektedir? 1996 senesinde biyoistatistikçi Robert Tibshirani tarafından bulunan bir algoritmaya **Lasso** denilmektedir ve modeldeki farklı faktörlerin toplam ağırlıklarında ceza kullanmaktadır.* Faktörlerin ağırlıkları üzerine bu şekilde bir baskı kurarak Lasso metodu, bunları mümkün olduğu kadar sıfıra doğru itmektedir. Sadece sonuç üzerinde büyük bir etkisi olan faktörler denklemdaki yerini korur ve böylece, örneğin dokuz faktöre sahip fazla uyum sağlamış bir modeli sadece bir iki kritik faktörün olduğu dirençli bir modele dönüştürür.

Lasso gibi teknikler makine öğrenme konusunda oldukça yaygındır ancak bu prensibin aynısı -karmaşıklık için bir ceza uygulaması- aynı zamanda doğada da gözlenmektedir. Yaşayan organizmalar, zaman, hafıza, enerji ve dikkat konusundaki kısıtlar nedeniyle basitliğe doğru neredeyse otomatik bir şekilde itilmektedir. Örneğin metabolizmanın üzerindeki yük, organizmalar için bir fren görevi görür ve aşırı karmaşık bu makine için kalori cezası uygular. İnsan beyninin, günlük alınan kaloringin yaklaşık beşte birini yakıyor olması, entelektüel yeteneklerimizin bize sağladığı evrimsel avantajların bir mirasıdır. Beynimizin bize katkıları bu yakıt faturasının karşılığını ödemektedir. Diğer taraftan önemli derecede *daha karmaşık* olan bir beynin, çok da yeterli kâr sağlayacak katkıda bulunmadığı çıkarımında da bulunabiliriz. İhtiyacımız olduğu kadar beynimiz vardır, müsrifçe harcanacak bir fazlalığımız yok.

Aynı türden bir sürecin, sinirsel seviyede de bir rol oynadığına inanılmaktadır. Bilgisayar biliminde, “yapay sinir ağları” olarak bilinen beyne dayalı yazılım modelleri gelişigüzel bir şekilde karmaşık fonksiyonları öğrenebilirler -hatta yukarıdaki dokuz faktörlü modelimizden bile daha esnektirler- lakin bu esneklikle-

* Matematik açısından konuya ilgi duyanlar için bu, değişkenlerin katsayılarının mutlak değerlerinin toplamına eşittir.

ri nedeniyle fazla uyum sağlamaya karşı çok hassas olmakla kötü bir üne sahiptirler. Gerçek biyolojik sinir ağları bu sorundan kaçınmaktadır çünkü performansları ve bunun sürdürülebilirliği arasında karşılıklı bir taviz dengesi kurması gereklidir. Örneğin, sinir sistemleri konusunda çalışan bilim insanları beyinlerin herhangi bir anda ateşlenmekte olan nöronlarının sayısını minimize etmeye çalışmasını tavsiye etmektedir. Yani, Lasso metodundaki gibi karmaşıklık üzerindeki baskı uygulama metodunun aynısıdır.

Dil, bir başka doğal Lasso aracı sunmaktadır. Karmaşıklık daha uzun bir süre konuşmak ve karşımızdaki dinleyicinin dikkat sınırlarını zorlamakla cezalandırılır. İşle ilgili planlar bir asansör konuşmasına sığacak şekilde sınırlandırılır ve hayatla ilgili tavsiyeler sadece yeteri kadar kısa ve akılda kalıcı olurlarsa özlü bir deyiş hâlini alırlar. Ve hatırlanması gereken her şey, hafızanın Lassosundan geçmek zorundadır.

Sezgisel (Hüristik) Yaklaşımların Avantajları

Ekonomist Harry Markowitz 1990 Nobel Ekonomi Ödülü'nü modern portföy teorisini geliştirmesi nedeniyle kazandı. Onun çığır açan “ortalama varyans portföy optimizasyonu” çalışması bir yatırımcının belirli bir risk düzeyinde getirileri maksimize etmek için çeşitli fon ve varlıklar arasında nasıl bir optimal tahsis yapabileceğini göstermişti. Bu nedenle iş, kendi emeklilik birikimlerini yatırımda kullanmaya gelince Markowitz, en iyi donanıma sahip kişi gibi görünmekteydi. Peki, o ne yapmaya karar vermişti?

Varlık sınıflarının geçmişteki kovaryanslarını hesaplamış olmam ve bir etkinlik sınırı çizmem gerekirdi. Oysa ki ben borsanın yükseldiği ve benim bunun içinde olmadığım ya da borsanın çok düştüğü ve benim tamamen içinde bulunduğum

felaket senaryosunu gözümde canlandırdım. Benim amacım gelecekteki pişmanlığımı minimize etmektir. Bu nedenle yatırımımı hisse senedi ve bonolar arasında yarı yarıya böldüm.

Neden böyle bir şey yapmıştı ki? Nobel ödülü sahibi kişinin ve onun yatırım stratejisi hikâyesi insan mantıksızlığı olarak bile gösterilebilir. Yaşamın karmaşıklığıyla yüzleştğinde rasyonel modeli bir kenara bırakıp basit bir sezgisel modeli izlemişti. Fakat basit bir sezgisel yaklaşımın aslında akılcı bir çözüm olabilmesinin nedeni gerçek yaşamın karmaşıklığının ta kendisidir.

İş portföy yönetimine geldiğinde pazarlar hakkında elinizde olan bilgi konusunda oldukça yüksek bir güven seviyesine sahip olmadığınız sürece bu bilgiyi göz ardı etmeniz aslında daha iyi olabilir. Markowitz'in optimal portföy tahsis planını uygulamak farklı yatırım araçlarının istatistik özelliklerine dair iyi tahminlere sahip olmayı gerektirir. Bu tahminlerdeki bir hata, muhtemelen riski artıracak çok farklı değer tahsisleriyle sonuçlanabilir. Oysa ki hisse senetleri ve tahviller arasında paranızı eşit bir şekilde bölmek sizin gözlemlemiş olduğunuz veriden etkilenmemektedir. Bu strateji kendisini bu yatırım türlerinin eski performanslarına uydurmayı bile denemez, bu nedenle de fazla uyum sağlamasının ihtimali bulunmamaktadır.

Elbette sadece yarı yarıya paylaşmak karmaşıklığın en etkili noktası değildir fakat bunun hakkında söylenmesi gereken bir şey vardır. Eğer bir dizi yatırım aracının beklenen ortalamasını ve beklenen varyansını biliyorsanız o zaman ortalama varyans portföy optimizasyonunu kullanın. Optimal algoritmanın optimal olmasının bir nedeni vardır. Fakat bunları doğru bir şekilde tahmin etme olasılığınız düşük ve modelin tam olarak güvenilme- yen değerlere yüklediği ağırlık derecesi yüksek olduğunda karar verme sürecinde alarmların harekete geçmesi gerekir. Düzenli- leştirme zamanıdır.

Markowitz'in emeklilik birikimlerine benzer örneklerden ilham alan psikolog Gerd Gigerenzer ve Henry Brighton, insanların gerçek yaşamlarında kullandıkları karar verme kısa yollarının birçok durumda tam olarak iyi kararlara götüren türden düşünme şekli olduğunu ileri sürmüşlerdir. “Daha kısa süreçlerin kesin doğruluğa götürmediğine dair olan yaygın görüşlerin aksine, sezgisel metotlar üzerine yapılan araştırmalar daha az bilgi, hesaplama ve zamanın aslında kesinliği artırdığını göstermektedir.” Basit cevapların -daha az faktöre sahip ya da daha az hesaplama içeren- arkasında olan bir sezgisel yaklaşım, genellikle “az ama öz” etkisini sunmaktadır.

Bir modelin en nihai karmaşıklığı üzerine cezalar uygulamak, fazla uyum sağlamayı ortadan kaldırmanın tek yolu değildir. Ayrıca bir modelin gelen veriye adapte olma hızını kontrol ederek de basitliğe doğru itebilirsiniz. Bu eylem, fazla uyum sağlama konusundaki çalışmaları hem bir tür hem de topluluk olarak tarihimize ışık tutacak hâle getirir.

Geçmişin Ağırlığı

Bir farenin yediği her şey, ölümüne yol açmamalıdır.

—Samuel REVUSKY ve Erwin BEDARF,

“Yeni Nesil Gıdaların Hastalıklarla Olan İlişkisi

(Association of Illness with

Prior Ingestion of Novel Foods)”

ABD’deki soya sütü pazarı 1990’ların ortasından 2013’e kadar olan süreçte dört kattan daha fazla büyümüştür. 2013 senesinin sonuyla birlikte haberlerde yer alan bilgilere göre yerini badem sütüne bırakarak pazarda ikinci sıraya gerileyip eski gıdalar arasına katılmıştır. Yiyecek ve içecek hizmetleri araştırmacısı Larry Finkel, *Bloomberg Businessweek* dergisine şöyle demeç vermişti: “Şimdilerde fındık ve badem moda. Soya kulağa daha eski

moda sağlıklı yiyecek gibi gelmektedir.” Soya sütünü popüler hâle getirmesiyle ünlü Silk şirketi 2013’ün sonlarında, yılın sadece son çeyreğinde badem sütü ürünlerinin yüzde 50’den fazla arttığını bildirmiştir. Bu esnada bir diğer içecek dünyası haberine göre de hindistan cevizi suyu markası olan Vita Coco, 2014 senesinde satışlarını 2011’den bu yana iki katına, 2004’ten bu yana bakılacak olursa muhteşem bir şekilde üç katına çıkardığını açıkladı. *New York Times*’a göre “hindistan cevizi suyu günlük yaşamda tanınmamışlıktan vazgeçilmezliğe doğru sıçrama yapmış gibi görünmektedir.” Yine bu sırada, kara lahana pazarı sadece 2013 senesinde yüzde 40 büyüdü. Bir önceki sene en büyük kara lahana alıcısı, salata barlarına dekoratif olarak bunları koyan Pizza Hut idi.

Ne yememiz gerektiği gibi insan yaşamının en temel alanlarının bazıları ilginç bir şekilde kısa süreli hevesler tarafından yönlendirilmektedir. Bu geçici heveslerin fırtına gibi esmelerine olanak tanıyan şeyin bir kısmı, kültürümüzün hızlı bir şekilde değişmesidir. Günümüzde bilgi, toplum içerisinde daha önce olmadığı kadar hızlı bir şekilde akmaktadır ve küresel tedarik zincirleri müşterilerin alışveriş alışkanlıklarını hızlı bir şekilde değiştirmesine imkân tanımaktadır (ve pazarlamacılar da bunu teşvik etmektedir). Eğer bir çalışma, diyelim ki yıldız anason bitkisinin sağlık için faydalı olduğunu söyleyerek önerecek olursa bir hafta içerisinde tüm bloglara yayılır, ertesi hafta televizyonları sarar ve altı ay içerisinde yayınevlerinden çıkmakta olan anason yemek tarifi kitaplarıyla birlikte tüm süpermarketlerde yerini alır. Nefes kesici bu hız hem bir lütuf hem de bir lanettir.

Buna karşın, insanların da arasında olduğu organizmaların evrim şekline bakacak olursak, ilginç bir şey fark ederiz. Değişim yavaş bir şekilde olmaktadır. Bu durum, modern çağ organizmalarının sadece mevcut çevrelerine göre değil, aynı zamanda geçmişlerine göre şekillenmekte olduğu anlamına gelmekte-

dir. Örneğin sinir sistemimizin garip bir şekilde çapraz bağlı olması (vücudumuzun sol tarafının beynimizin sağ, sağ tarafımızın ise beynimizin sol kısmıyla kontrol edilmesi) omurgalıların evrimsel tarihini yansıtmaktadır. “Çaprazlama” denilen bu olgu, ilk omurgalıların vücutlarının 180 derece dönebildiği bir noktaya kadar geri gitmektedir. Yengeç ve toprak kurdu gibi omurgasızların sinir sistemleri “bel” bölgelerinde yer almasına karşın, omurgalıların sinir sistemleri sırtlarındaki omurlardan dağılmaktadır.

İnsan kulağı bu konuda bir diğer örneği teşkil etmektedir. İşlevsel açıdan bakıldığında ses dalgalarını üç kemik (çekiç, örs ve üzengi) aracılığıyla elektrik sinyallerine dönüştüren bir sistemdir. Bu sistem etkileyicidir fakat nasıl işlediğine dair özellikler, geçmişteki kısıtlarıyla oldukça ilgilidir. Sürüngenlerin kulaklarında tek kemikleri olduğu ve çenelerinde memelilerde olmayan bazı kemiklere sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu çene kemiklerinin aslında memelilerde yeniden şekillendirildiği ortaya çıkmıştır. Kulak anatomimizin tam formu ve düzeni çözülmekte olan işitme sorunları kadar evrimsel geçmişimizi de yansıtır.

Fazla uyum sağlama düşüncesi bize bu tarz evrimsel paketlerdeki erdemi görmek için bir yol verir. Çapraz sinir bağlantıları, yeniden şekillendirilmiş ve işlev kazandırılmış çene kemikleri optimalliğin altında düzenlemeler gibi gözükseler de evrimin bir organizmayı çevresindeki her türlü değişikliğe tamamen optimize etmesini istemek zorunda değiliz ya da en azından bunu yapmanın bizi daha fazla çevresel değişikliğe karşı aşırı derecede hassas kılacağını bilmemiz gerekir. Diğer taraftan mevcut malzemenin en iyi şekilde faydalanmak yararlı bir kısıtı bize sunmaktadır. Organizmaların yapısında önemli değişikliklere neden olmak oldukça zordur. Geçmiş tarafından sınırlanan bizler, şimdiye daha az mükemmel şekilde uyum sağladık ama bilmediğimiz geleceğe karşı güçlü kılınacağız.

Benzer bir bakış açısı, insan toplumunun hızla hareket eden heveslerine direnmede bize yardım edebilir. Kültür söz konusu olduğunda gelenek, evrimsel kısıtlamaların rolünü oynar. Biraz muhafazakârlık, geçmişin lehine olacak şekilde bir tutam ön yargı, geçici heveslerin dalgalarına kapılmama konusunda bize destek olabilir. Elbette ki bu, en son verileri göz ardı etmeliyiz anlamına gelmemektedir. Yenilikleri takip edelim ancak bunu körü körüne teslim olacak şekilde yapmayalım.

Otomatik olarak öğrenmede yavaş hareket etmenin avantajları en somut biçimde **Erken Durma (Early Stopping)** olarak bilinen bir düzenleme tekniğinde ortaya çıkar. Kitabın bu bölümünün başında yer alan Alman evlilik verisine baktığımızda hemen en iyi uyuma sahip bir, iki ve dokuz faktörlü modelleri incelemeye koyulduk. Ancak birçok durumda belirli bir veri seti için mümkün olan en iyi uyumu bulmak adına parametreleri ayarlamanın kendisi bir süreçtir. Eğer bu süreci erkenden keser ve bir modele aşırı derecede karmaşık bir hâl alması için gerekli zamanı tanımazsak ne olur? Yine burada yarım bırakılmış ya da tamamlanmamış gibi görünen şey aslında kendi açısından doğru bir strateji olmaktadır.

Örneğin pek çok tahmin algoritması çok faktörlü bir modele atlamaktansa en önemli olan tek faktörü arayarak işe başlar. Sadece aradıkları o ilk faktörü bulduktan sonra modele eklemek için ikinci en önemli faktöre, sonra da üçüncüye bakarak ilerlerler. Bu şekilde ilerlendiğinde modelleri aşırı derecede karmaşık olmaktan, fazla uyum sağlamış modele sızmaya fırsat bulamadan süreci kısa keserek korunabilir. Veri setindeki tüm noktaları dikkate almadan önce her seferinde bir veri noktasını dikkate alacak şekilde ayarlanmış bir model yapısı da benzer şekilde model karmaşıklığını kademeli şekilde artırır ve böylece süreci kısa kesmek fazla uyum sağlama yaşanmasına engel olabilir.

Daha fazla zamanın daha fazla karmaşıklık anlamına geldiği bu tarz bir kurgu birçok insan gayretinin özelliklerini açıklamaktadır. Bir şey hakkında karar vermek için kendinize daha fazla zaman tanımak sizin daha iyi karar vereceğiniz anlamına gelmek zorunda değildir. Fakat sizin en sonunda daha fazla faktörü, daha fazla hipotezi, daha fazla artı ve eksiye göz önüne alacağınızı ve bu nedenlerle fazla uyum sağlama riski yaşayacağınızı garanti eder.

Tom öğretim elemanı olduğunda tam da bu tecrübeyi yaşamıştı. İlk defa ders verdiği sınıftaki ilk sömestrinde derslerini mükemmelleştirmek için çok fazla zaman harcamıştı. Bir saatlik ders için on saatten fazla hazırlık süresi. Farklı bir sınıfa ders verdiği ikinci sömestrde bu kadar zaman ayıramadı ve bunun bir felakete neden olacağı endişesini taşıdı. Fakat çok garip bir şey oldu. Öğrenciler ikinci ders dönemini sevmişti. Aslında, ilkinden daha da fazla sevmişlerdi. İlk dönem ayrılan ekstra saatlerin aslında sadece öğrencilerin kafalarını karıştıran gereksiz detaylara ayrılmış olduğu ortaya çıktı ve Tom sonraki yarıyıl bunları çıkarıp attı. Tom nihayetinde altta yatan sorunun, öğrencilerinin ölçütü yerine kendi zevk ve muhakemesini kullanması olduğunu fark etti. Bu ölçüt bir yakınsama olarak akla yatmaktaydı ama fazla uyum sağlamaya değmezdi. Bu da tüm yansılarını “mükemmelleştirmek” için sancılı bir şekilde harcanan ekstra saatlerin üretkenlikten uzak olmasını açıklamaktaydı.

Her türden makine öğrenimi görevindeki düzenlemenin etkinliği, bilinçli bir şekilde daha az düşünerek ve daha az şey yaparak daha iyi kararlar alabileceğimizi ileri sürmektedir. Eğer ilk olarak karşımıza çıkan faktörler muhtemelen en önemli faktörlerse, problem hakkında bir noktadan sonra daha fazla düşünmek sadece zaman ve çaba israfı olmayacak, aynı zamanda bizi daha kötü çözümlere ulaştıracaktır. Erken Durma mantığına bürünmeye karşı mantıklı bir argüman sağlamaktadır. Ancak bu yaklaşımı

uygulama açısından bir tavsiyeye dönüştürmek bir sorunun daha cevaplanmasını gerektirir. Problem hakkında düşünmeyi ne zaman sonlandırmalıyız?

Ne Zaman Daha Az Düşünmeliyiz?

Fazla uyum sağlamayla ilgili tüm sorunlarda olduğu gibi ne kadar erken durulacağı, neyi ölçebildiğiniz ile neyin gerçekten önemli olduğu arasındaki farka bağlıdır. Eğer elinizde tüm bilgiler hatasız ve belirsizlikten arınmış bir şekilde mevcutsa ve sizin için neyin önemli olduğunu değerlendirebiliyorsanız düşünme işlemini erkenden sonlandırmayın. Uzun uzun ve sıkı bir şekilde düşünün: Karmaşıklık ve çabalar uygundur.

Ancak hemen hemen hiçbir zaman durum bu değildir. Eğer yüksek derecede belirsizlik varsa ve veri sınırlıysa elinizden geldiği kadar erkenden durun. Eğer işinizin nasıl ve kimin tarafından değerlendirileceği konusunda açık bir bilgi sahibi değilseniz mükemmelliğin ne olabileceği konusunda kendinize (ya da bir başkasına) has tahmin yürütmek için ekstra zaman harcamaya değmez. Belirsizlik ile ölçebildiğiniz ve önemli olan şeyler arasındaki fark ne kadar çoksa, fazla uyum sağlama konusunda o kadar dikkatli olmanız gerekir. Yani, basitliği ne kadar çok tercih ederseniz o kadar erken durmanız gerekir.

Bilgi ve belirlilik konusunda tamamen karanlıkta kaldığınız anlarda en iyi şekilde hazırlanan planlar en kolay ve basit olanlardır. Beklentilerimiz belirsiz ve veri de gürültülü olduğunda en iyi tercih kalın bir fırçayla resmi boyamak ve geniş kalıplar içinde düşündürmektir. Bazen durum kelimenin tam anlamıyla böyle olur. Girişimciler Jason Fried ile David Heinemeier'in anlattığı gibi, ne kadar ilerisi için beyin fırtınası yapmaları gerekirse o kadar kalın uçlu bir kalem kullanmaları gerekmektedir (yazı ölçüsü bakımından zekice bir kullanım şekli).

Bir şey tasarlamaya başladığımızda, fikirlerimizi ince uçlu bir kalem yerine kalın bir kalemle taslak şeklinde çizeriz. Neden mi? İnce uçlu kalemler çok hassas. Çözünürlükleri çok yüksek. Gölgelelendirmeyi mükemmelleştirmek ya da nokta nokta veya çizgi çizgi şeklinde bir çizim metodu kullanmak gibi, henüz endişe etmenize gerek olmayan şeyler için endişelenmenize neden olurlar. Hâlen odağınızın merkezinde yer almasına gerek olmayan şeylere odaklanmaya başlarsınız.

Kalın uçlu kalemle çalışmak derin detaylara inmenize engel olur. Sadece şekilleri, çizgileri ve kutuları çizebilirsiniz. Bu iyi bir şeydir. Büyük resim, başlangıçta dikkat etmeniz gereken tek şeydir.

McGill'den Henry Mintzberg'in belirttiği gibi "Eğer neyin önemli olduğunu ölçemediğimiz bir yerden başlarsak ve oradan ilerlersek ne olur? O zaman ölçüm yerine oldukça korkutucu bir yöntem kullanırız. Bunun adı muhakemedir."

Erken Durmanın sonucu bazen durum akla yatkın olan ile içgüdü arasında seçim yapmak değildir. İlk içgüdümüze göre hareket etmek akla yatkın çözüm *olabilir*. Karar ne kadar karmaşık, istikrarsız ve belirsizse, o kadar akla yatkın bir yaklaşım gerekir.

Darwin'e dönersek, evlilik teklif etme ya da etmemeye karar vermeye ilişkin problemi sadece tanımlamış olduğu ilk artı ve eksiden sonra muhtemelen çözümlenebilirdi. Arkadan gelen ve soruna eklenenler ise gerekli olmadıkları hâlde yardım sağlamsızın karara ilişkin zaman ve endişeyi artırmıştı (ve muhtemelen karara zarar vermeye bile çalışmıştı). Onun karar vermesini sağlayan şey "bir kişinin tüm hayatını işçi arı gibi sadece çalışarak ve başka hiçbir şey yapmadan geçirmesi fikrinin kabul edilemez olduğu" düşüncesi gibi görünüyordu. Çocuklar ve bir hayat arkadaşının olması -bahsetmiş olduğu ilk artılar- tam ola-

rak onun evlilik lehine karar almasını sağlayan özelliklerdi. Onun defter üzerinde yaptığı hesap ise sadece dikkatini dağıtan bir şey olmuştu.

Fakat Darwin’i aşırı derecede fazla düşünen biri gibi resmederek eleştirmeden önce günlüğündeki sayfaya bakmak gerekir ki birebir kopyasını görmek harika bir şeydir. Darwin, Franklin değildi ve düşünceleri günlerce birbirine eklemezdi. Hayatını etkileyecek karara ciddi bir şekilde yaklaşmasına karşın Darwin, kararını sayfanın sonuna ulaştığında vermişti. *Sayfayı düzenlemekteydi*. Bu durum hem Erken Durma hem de Lassonun bir göstergesidir: Sayfaya girmeyen şey kararı etkilemez.

Evlenme yönünde karar alan Darwin bu, sefer de zaman kaybetmeden zamanlama üzerine düşünmeye koyuldu. “Ne zaman? Hemen mi yoksa biraz daha geç mi?” konusunda bir başka artılar ve eksiler listesi kaleme aldı ve mutluluktan Galler’e yapacağı balon gezisinin uzun süredir kendisini saran arzusunun maliyetine kadar her şeyi değerlendirdi. Sayfanın sonunda “Boş ver, şansına güven” yazacaktı ve sonuçta birkaç aylık zaman zarfında Emma Wedgwood’a evlenme teklifi gelecekti ve oldukça tatmin edici bir birliktelikle mutlu bir aile yaşantısının başlangıcı olacaktı.

8 Rahatlama

Bırak Gitsin

Meghan Bellows 2010 senesinde gündüzleri kimya mühendisliği alanında Princeton’da doktoraşı üzerine, geceleri ise düğününü planlama üzerine çalışmaktaydı. Araştırması, amino asitleri belirli özelliklere sahip bir molekül üretmek için protein zincirinde doğru yerlere koymakla ilgiliydi. (“Eğer iki proteinin bağlanma enerjisini maksimize ederseniz, o zaman bazı biyolojik fonksiyonların peptid bir inhibitörünü başarılı bir şekilde tasarlayabilir ve bir hastalığın ilerlemesini gerçekten engelleyebilirsiniz.”) Düğün konusunda ise yerleşim planına saplanıp kalmıştı.

Dokuz tane üniversite arkadaşını aynı masaya oturtacaktı lakin Bellows, bu masaya onuncu kişi olarak kimi koyacağı konusunda karar veremiyordu. Daha da kötüsü, on bir yakın akrabası olduğunu tespit etmişti. Bu masadaki değerli büyüklerden kim ayrı kalacaktı ve bunu ona nasıl açıklayacaktı? Peki ya çocukluk komşuları ile bebek bakıcısı, hatta anne babasının iş arkadaşları gibi aslında hiç kimseyi tanımayan kişiler ne olacaktı?

Bu problem, laboratuvarında çalışmakta olduğu protein problemi kadar zor gelmeye başlamıştı. Daha sonra bir anda kafası-

na dank etti. Düşün problemi aslında laboratuvarda üzerinde çalışmakta olduğu problemin *ta kendisiydi*. Bir akşam oturma planlarına bakarken “doktora tezimdeki amino asitler ve proteinler ile düşünümdeki masaların yerleşimi arasında bire bir ilişki bulunduğunu fark ettim.” Bellows nişanlısından boş bir kâğıt istedi ve denklemler karalamaya başladı. Amino asitler düşün davetlilerine, bağlanma enerjileri ilişki ve akrabalık derecesine ve moleküllerin en yakın komşu olarak adlandırılan ilişkileri de en yakın etkileşimlere dönüştü. Araştırmasındaki algoritmaları kendi düşün problemini çözmek için kullanabilirdi.

Bellows tüm misafirler arasındaki ilişkilerin gücünü sayısal olarak tanımlamak için bir yol geliştirdi. Eğer kişiler birbirlerini tanımıyorlarsa 0, tanıyorlarsa 1 ve eğer bir çift iseler 50 puan alıyorlardı. (Gelinin nedimesinin birlikte oturmak istediği bir kişiye 10 puan verme hakkı vardı.) Bellows daha sonra birkaç kısıt belirledi: Masaların maksimum kapasitesi ve her masa için gerekli minimum puan, böylece masaların hiçbirisi tamamen birbirlerine yabancı kişilerden oluşmayacaktı. Ayrıca programın amaç fonksiyonunu da tanımlayarak kodladı: Konuklar ile masalarındaki diğer kişilerin birlikte oluşturdukları ilişki puanlarını maksimize etmek.

Düşünde 107 konuk ve her biri 10 kişilik 11 masa vardı. Bunun anlamı 11^{107} muhtemel oturma düzeniydi. 112 basamaklı bir sayıya tekabül ediyordu (bilinen evrendeki atom sayısı ancak 80 basamaklıdır) ve 200 milyar googol (10^{100})’den fazla bir rakama karşılık geliyordu. Bellows işlemi laboratuvarındaki bilgisayara yükledi ve Cumartesi akşamı programı çalıştırdı. Pazartesi sabahı geldiğinde problem hâlen çalışmaktaydı. O ana kadar ki en iyi sonucu yazdırdı ve tekrar protein tasarımı işine koyuldu.

Yüksek güçlü bir laboratuvar bilgisayarına ve 36 saatlik kesintisiz işlem süresine rağmen programın muhtemel oturma düzenlerinin sadece bir kısmından daha fazlasını değerlendirme

şansı yoktu. En yüksek skoru alacak gerçek optimal çözüme o ana kadarki permütasyonlar içerisinde muhtemelen henüz ulaşamamıştı. Bellows yine de bilgisayardan aldığı sonuçtan memnundu. Planlayıcıların daha önce dikkate almadığı ilişkileri görmekten memnun bir şekilde, “Bizim unuttuğumuz ilişkileri de tanımlamıştı” diyordu. Örneğin kendi anne babasını aile masasından ayırmayı ve bunun yerine onları yıllardır görmedikleri eski dostlarının masasına yerleştirmeyi önermişti. Son teklifi düğün sahipleri tarafından kabul edilmişti ama gelinin annesi birkaç ufak düzeltme yapmaktan kendisini alamamıştı.

Princeton’daki bir laboratuvarın hesaplama gücünün kusursuz bir oturma planını bulamamış olması gerçeği şaşırtıcı gibi görünebilir. Şu ana kadar bahsetmiş olduğumuz alanların çoğunda basit ancak doğrudan yaklaşım içeren algoritmalar optimal çözümleri garanti edebilirler. Fakat son yıllarda bilgisayar mühendislerinin bulmuş olduğu gibi, kusursuz bir çözümün aslında ulaşılamaz olduğu problem türleri mevcuttur: Ne kadar zekice programlar yazarsak yazalım, bilgisayarlarımızın hızlarını ne kadar artırırsak artıralım. Aslında görünüşte tamamen başarıya ulaşılamayacak bir zorluk karşısında ne sonsuza kadar çalışmanız ne de pes etmeniz gerektiğini, bunun yerine tamamen farklı üçüncü bir yolu denemeniz gerektiğini bilgisayar mühendislerinden daha iyi kimse bilemez.

Optimizasyonun Zorluğu

Abraham Lincoln ülkeye Amerikan İç Savaşı’nda önderlik etmeden, Bağımsızlık Bildirisi’ni kaleme almadan ya da Gettysburg konuşmasını yapmadan önce 16 yıl boyunca senede iki kere sekizinci yasama bölgesini turlayacak şekilde Illinois, Springfield’da “kırsal bölge avukatı” olarak çalıştı. 14 kırsal bölgedeki kasabalar arasında davalar için geziyor, haftada yüzlerce mil kat edecek şekilde seyahat ediyordu. Bu turları planlamak doğal bir

zorluk ortaya çıkarmaktaydı. Mümkün olduğu kadar az mil kat ederek ve hiçbir kasabaya ikinci kez uğramadan gerekli tüm kasabalara nasıl uğrayabilirdi?

Bu, matematikçi ve bilgisayar mühendislerince “kısıtlı optimizasyon” olarak bilinen bir problemdir: Belirli bir kural seti ve puan ölçüm sistemi göz önüne alınarak bir dizi değişkenin en iyi tek düzenini bulmak. Aslında, en ünlü optimizasyon problemi. Eğer 19’uncu yüzyılda çalışılmış olsaydı sonsuza kadar “kırsal bölge avukat problemi” ya da ilk defa 21’inci yüzyılda ortaya çıksaydı ismi “teslimat ‘drone’u problemi” olarak bilinirdi. Fakat sekreter problemine benzer bir şekilde 20’nci yüzyılın ortalarında meydana çıktı ve “seyyar satıcı problemi” olarak adlandırıldı.

Rota planlama (araç rotalama) 1930’lara kadar matematikçilerin dikkatini çekmedi ama daha sonra çok şiddetli bir şekilde ilgi alanlarına girdi. Matematikçi Karl Menger, sadece mümkün olan tüm olasılıkları denemekten daha basit bir çözümün bilinmediği “postacı probleminden” 1930’da bahsetti. Hassler Whitney problemi 1934 senesinde Princeton’daki bir konuşmada dile getirdi ve buradaki sözcükler meslektaşları Merrill Flood’un (1’inci bölümden, sekreter problemine ilk çözümü getirmesinden hatırlayabileceğiniz) aklında kaldı. Flood, 1940’larda California’ya taşındığında bu problemi RAND Şirketi’ndeki arkadaşlarına yaydı ve problemin ikonik ismi 1949’da ilk defa matematikçi Julia Robinson’ın bir yayınında yer aldı. Problem matematik çevrelerinde dolaştıkça, giderek büyüyen kötü bir nam da saldı. Zamanın en büyük zekâlarından bazıları bunun hakkında saplantılı hâle geldiler ve hiç kimse gerçek bir ilerleme kaydedemedi.

Seyyar satıcı probleminde soru bir bilgisayar ya da matematikçinin en kısa yolu *bulabilmesi* değildir. Bir kişi teorik olarak tüm muhtemel güzergâhları kâğıda dökebilir ve bunları tek tek ölçebilir. Ancak buradaki sorun kasabaların sayısı arttıkça, bun-

ları birbirine bağlayan rotaların sayısında patlama yaşanmasıdır. Bir rota, kasabaların sıralanmış bir dizisidir ve bu nedenle muhtemel rotaları sıralamak korkulan $O(n!)$ faktöriyel zamanına karşılık gelir. Hesaplama açısından bir deste kâğıdı havaya atıp sıralı bir şekilde yere düşmelerinin matematiksel açıdan tam olarak eşitidir.

Buradaki soru şudur: Bunu daha iyi bir performansla yapmanın bir yolu var mıdır?

Onlarca yıllık çalışmalar, seyyar satıcı problemini yumuşatmak için çok az şey yapabilmiştir. Örneğin Flood 1956 senesinde, yani problemle ilk karşılaşmasının üzerinden 20 yıldan fazla zaman geçtikten sonra şöyle yazmıştı: “Problemin başarılı bir şekilde çözümü için şu ana kadar kullanılanlardan oldukça farklı bir yaklaşım gerekli olabilir. Aslında, problem için genel bir metod olmayabilir ve olasılıksızlık sonucuna ulaşılabilir.” 10 yıl sonra ise bu konudaki tutumlar daha da karamsarlaşmış ve Jack Edmonds şöyle yazmıştı: “Seyyar satıcı problemi için iyi bir algoritmanın olmadığını düşünüyorum.”

Bu kelimelerin isabetli bir tahmin olduğu ortaya çıkacaktı.

Zorluğu Tanımlamak

Ulusal Standartlar ve Teknoloji Kurumu’ndan (National Institute of Standards and Technology) Edmonds, IBM’den Alan Cobham ile birlikte 1960’ların ortalarında bir problemin çözümünü neyin mümkün (feasible) kılıp kılmayacağına açıklama geliştirdi. Şimdilerde Cobham-Edmonds tezi olarak bilinen şeyi ileri sürdüler. Bir algoritma, “polinom zaman” [yani $O(n^2)$, $O(n^3)$ ya da n ’in herhangi bir üssü rakamda] denilen bir sürede çalışabiliyorsa “verimli (efficient)” olarak adlandırılmalıdır. Buna göre eğer bir problemi verimli bir algoritma kullanarak nasıl çözeceğimizi biliyorsak, bu “çözülebilir (tractable)” bir problemdir. Ancak polinom zamanda nasıl çözüleceğini bilmediğimiz bir problem

ise “çözülemez (intractable)” bir problemdir. En küçük ölçeklerde olanlar hariç, çözülemez problemler ne kadar güçlü olursa olsun hiçbir bilgisayarın çözebileceği türden değildir.*

Bu durum tartışmasız bir şekilde bilgisayar biliminin en merkezi bakış açısına uzanmaktadır. Bir problemin zorluğunu nicel olarak tanımlamak mümkündür. Ve bazı problemler sadece... *zordur*.

Peki, bu durumda seyyar satıcı problemi nereye düşmektedir? Oldukça merak etmemize rağmen bu konuda hâlen yeterince emin değiliz. Berkeley’den Richard Karp 1972’de, seyyar satıcı probleminin verimli bir şekilde çözülebileceğinin henüz kanıtlanmamış olduğunu ve tartışmalı problem sınıfına girdiğini gösterdi. Şu ana kadar da bu problemin verimli bir çözümü bulunmuş değildir -bu da problemi verimli bir şekilde çözülemez kılmıştır- ve birçok bilgisayar mühendisi bulunacak herhangi bir verimli çözümün olmadığına inanmaktadır. Bu nedenle Flood’ın 1950’lerde hayal ettiği seyyar satıcı için “olasılıksızlık sonucu” muhtemel kaderi olmuştur. Dahası, diğer birçok optimizasyon problemi -siyasi stratejiden kamu sağlığı ya da yangından korunmaya kadar her türlü uygulama alanında yaygın olan- benzer şekilde çözümsüzdür.

Fakat bu tarz sorunlarla uğraşan bilgisayar mühendisleri için bu karar hikâyenin sonu anlamına gelmemektedir. Hatta bu, tam tersine savaş çağrısı gibidir. Bir problemin çözümsüz olduğuna karar verdiğinizde ellerinizi kaldırıp teslim olmazsınız. Çizelgeleme alanında uzman olan Jan Karel Lenstra bize konu hakkında

* $O(n^2)$ ’den sıralama bölümünde kötü bahsedilmesine rağmen burada verimli olarak adlandırılması garip görünebilir. Gerçekte olan, $O(2^n)$ gibi küçük tabanlı rakamlarla üslü zamanlar, n^{10} gibi büyük tabanlı polinomlar yanında cehennem gibi bir hâl almaktadır. Bazı problem boyutlarında üs, her zaman polinoma üstün gelecektir. Eğer birkaç düzine şeyi sıralamaya çalışıyorsanız, n^{10} size 2^n ’e nazaran çocuk oyuncağı gibi görünür. Cobham ve Edmonds’un çalışmasından bu yana polinomlar (n üzeri bir şey) ve üslüler (bir şeyin n ’inci kuvveti) arasındaki bu karmaşa alanın sınırları aşan konusu olmuştur.

şunları söylemiştir: “Problem zor olduğunda bu sizin problemi unutup gitmeniz anlamına gelmemektedir, sadece farklı bir statüde olduğu anlamına gelmektedir. Bu ciddi bir düşmandır ve bununla mücadele etmek zorundasınız.” Ve işte tam bu noktada sahada hepimizin bir şeyler öğrenebileceği, çok değerli bir şey keşfedilmiştir. Optimal çözümleri olmayan problemlere en iyi nasıl yaklaşılr? Nasıl rahatlanacak?

Sadece Rahatlayın

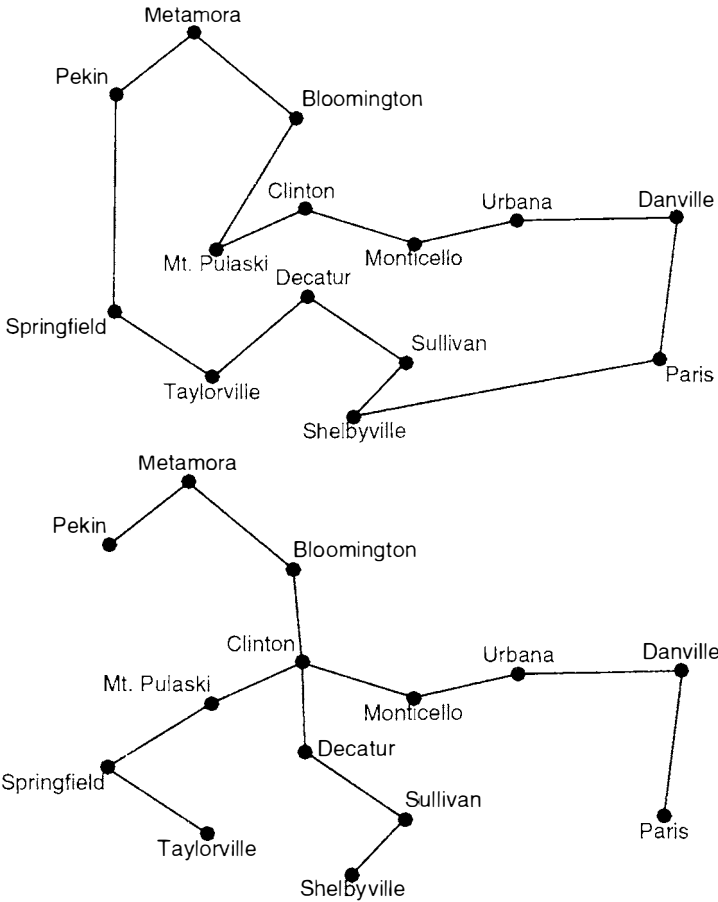
Mükemmel, en iyinin düşmanıdır.

—Voltaire

Bir kişi size rahatlamanızı söylediğinde, muhtemelen gergin olduğunuz içindir. Bir şeyleri gereğinden fazla büyötmektesiniz. Bilgisayar mühendisleri sıkı bir zorlukla karşı karşıya kaldıklarında akılları hemen rahatlamaaya gider ve *An Introduction to Relaxation Methods* (Rahatlama Metotlarına Giriş) ya da *Discrete Relaxation Techniques* (Farklı Rahatlama Teknikleri) gibi kitapları karıştırırlar. Fakat bu kişiler kendilerini rahatlatmazlar, problemleri gevşetirler.

Bilgisayar bilimindeki gevşetmelerin en basit türlerinden birisi **Kısıt Gevşetmesi (Constraint Relaxation)**’dir. Araştırmacılar bu teknikte, problemin bazı kısıtlarını kaldırırılar ve problemi olmasını istediği gibi çözmeye başlarlar. Belirli bir mesafe kat ettikten sonra kısıtları geri eklemeye çalışırlar. Yani problemi tekrar gerçek hâline getirip ele almadan önce geçici bir şekilde basitleştirirler.

Örneğin, seyyar satıcı problemini, satıcının aynı kasabaya birden fazla defa uğramasına ve izlediği yolları karşılıksız olarak geri gitmesine izin vererek gevşetebilirsiniz. Daha esnek olan bu kurallar altında en kısa güzergâhı bulmak “en kısa örten ağaç (minimum spanning tree)” denilen şeyi üretir. (Eğer isterseniz,



Şekil 8.1 Lincoln'ün 1855'teki adli seyahati için en kısa seyyar satıcı güzergâhı (üstte) ve en kısa örten ağaç (altta) sonuçları.

en kısa örten ağacı her kasabayı en az bir kasabaya bağlamak için gerekli en az uzunluktaki yol olarak da düşünebilirsiniz. En kısa seyyar satıcı güzergâhı ve Lincoln'ün adli seyahat döngüsü aşağıda gösterilmiştir.) Sonuçta daha gevşek olan bu problemi çözmek bir bilgisayarın neredeyse hiç zamanını almaz. En kısa örten ağaç gerçek problemin çözümünü sunmasa da oldukça kullanışlıdır. İlk olarak, en kısa örten ağaç geri gidebilmeye izin vermeme özelliğiyle asla gerçek problem çözümünden daha

uzun olmayacaktır. Bu nedenle gevşetilmiş problemi -fanteziyi- gerçek durumun alt sınırı olarak kullanabiliriz. Eğer bir dizi kasa için en kısa örten ağaç uzunluğunu 160 km. olarak hesaplırsak, seyyar satıcı problem çözümünün bundan daha kısa olmayacağından emin olabiliriz. Ve eğer 170 km. gibi bir sonuca ulaşırsak bunun en iyi çözümden en fazla 10 km. fazla olduğundan emin olabiliriz. Böylece en iyi cevabın daha ne olduğunu bilmeden ona ne kadar yakın olduğumuzu öğrenmiş oluruz.

Daha da iyisi, seyyar satıcı probleminde en kısa örten ağaç sonucu, gerçek çözümü aramaya başlamak için en iyi çözüm noktalarından biridir. Bunlar gibi yaklaşımlar, hayal edilebilen en büyük seyyar satıcı problemlerinden birinin -dünya üzerindeki tüm şehirlere uğrayan en kısa güzergâhı bulmak- (bilinmeyen) optimal sonucun yüzde 0,05'ten daha yakınında olacak şekilde çözülebilmesini sağlar.

Çoğumuz Kısıt Gevşetmesinin algoritmik versiyonuyla karşılaşmamış olsak da bu yaklaşımın içerdiği mesaj, hayatın soruları hakkında büyük hayalleri olan hemen herkese aşinadır. Bir motivasyon seminerinde duymuş ya da bir danışmanın duvarında görmüşsünüzdür: *Eğer korkmasaydınız, ne yapardınız?* Benzer şekilde, meslek ya da kariyer konularında soruları kafamızdan geçirirken *"Eğer büyük ikramiye kazansaydım ne yapardım?"* ya da *"Eğer tüm meslekler aynı maaşı ödüyor olsaydı ne yapardım?"* gibi soruları sorarız. Bu şekildeki düşünce eylemlerinin arkasında yatan fikir tam olarak Kısıt Gevşetme düşüncesiyle aynıdır: Çözülemez çözülebilir yapmak, gerçek yaşama aktarılabilir ideal bir dünyada ilerleme kaydetmek. Eğer önünüzdeki problemi çözemiyorsanız, onun daha basit bir versiyonunu çözün ve daha sonra bu çözümün size gerçek ve tam problemin çözümü için bir başlangıç noktası ya da bir yol gösterimi sunup sunmadığına bakın. Belki de sunuyordur.

Gevşetme yaklaşımının sizlere sunamayacağı şey, kusursuz

cevaba giden garanti bir kestirme yoldur. Ancak bilgisayar mühendisleri gevşetmenin zaman ile çözüm kalitesi arasındaki karşılıklı tavizde bulunmasını hesaplayabilmektedirler. Birçok durumda oran, düşünmeye bile gerek olmayacak kadar bariz bir şekilde ortadadır. Örneğin, kusursuz çözümün yarısı kadar iyi bir cevaba kusursuz çözüm için gerekli zamanın katrilyonda biri zamanda ulaşmak gibi. Buradaki mesaj basit ve oldukça etkilidir. Eğer kusursuza yakın çözümleri kabul etmeyi istiyorsak, etrafımızdaki en zorlu problemler bile doğru tekniklerle dize getirilebilir.

En kısa örten ağaç ve “piyango size çıksaydı ne olurdu” örneklerinde olduğu gibi kısıtları geçici olarak kaldırmak algoritmik gevşetmenin en basit şeklidir. Fakat gevşetmenin optimizasyon araştırmalarında sıklıkla görülen başka iki derin türü daha vardır. Alandaki şehir planlamasından hastalık kontrolü ve spor müsabakalarının desteklenmesine kadar en önemli çözülemez problemleri çözmede kullanışlı olduklarını kanıtlamışlardır.

Grinin Sayılamayacak Kadar Çok Tonu: Sürekli Gevşetme (Continuous Relaxation)

Seyyar satıcı problemi, tıpkı Meghan Bellows’un en iyi oturma planı arayışında olduğu gibi “ayrık optimizasyon (discrete optimization)” olarak bilinen ve çözümlerinin sürekli olmadığı optimizasyon problem türünün bir örneğidir. Satıcı bu kasabaya ya da şu kasabaya gider, ya beşinci ya da altıncı masadasınızdır. Bu seçeneklerin arasında kalan gri bir çözüm yoktur.

Bu tarz ayrık optimizasyon problemleri etrafımızda her yerdedir. Örneğin şehir planlayıcıları her eve belirli bir zaman içerisinde (örneğin 5 dk.) erişilebileceği noktalara itfaiye istasyonlarını yerleştirmeye çalışırlar. Wisconsin Madison Üniversite-

si'nden Laura Albert McLay "Tüm itfaiye ve acil durum birimleri bu kapsama modelini benimsemiştir ve bu model harikadır. Birçok problem hesaplama açısından çok zor bir hâl aldığında bunun yarısını ve şunun yarısını yapamazsınız" demektedir.

Ayrık optimizasyonda zor olan şey, sosyal çevrelerde de karşımıza çıkmaktadır. Tüm arkadaş ve tanıdıklarınıza bir parti vermeyi istediğinizi fakat çok fazla davetiye olacağı için zarf ve posta masraflarını ödemek istemediğinizi düşünün. Oysa ki sadece bağlantıları iyi olan birkaç arkadaşınıza davetiye göndermeye karar verebilir ve onlara "tanıdığımız herkesi getir" diyebilirsiniz. Bu durumda ideal olarak bulmak isteyeceğiniz şey, tüm sosyal çevrenizi tanıyan en küçük arkadaş alt kümenizi bulmaktır. Bu küme en az sayıda davetiye göndermenizi ve herkesin katılmasını sağlar. Bu yaklaşım kulağa sadece birkaç dolar için çok fazla iş yapıyormuşsunuz gibi gelse de seçime hazırlanan siyasi parti liderlerinin ve şirket pazarlamacılarının mesajlarını etkin biçimde yayma problemini tam olarak çözmek için istedikleri şeydir. Ve aynı zamanda bir toplumu salgın hastalıklardan korumak için en az kaç kişinin -ve kimlerin- aşılınması gerektiği problemini çözmek, doktorların üzerinde kafa patlattığı problemdir.

Daha önce de belirttiğimiz gibi, ayrık optimizasyonun tam sayılara olan bağımlılığı -bir itfaiye istasyonunda bir, iki ya da üç araç olabilmesi ve 2,5 ya da pi sayısı kadar araç gibi bir şeyin mümkün olmaması- ayrık optimizasyon problemlerini bu kadar zor kılan şeydir. Aslında hem itfaiye aracı hem de parti daveti problemi çözümsüzdür. Bu problemler için hiçbir verimli çözüm yoktur. Lakin bu problemlerin bir kesirli ya da ondalıklı sayının uygun çözüm olarak görüldüğü *sürekli* versiyonları için birtakım verimli stratejilerin olduğu ortaya çıkmıştır. Bir ayrık optimizasyon problemiyle karşılaşan araştırmacılar bu stratejilere kısıkanç gözlerle bakabilir lakin bununla birlikte daha fazlasını yapabilir-

ler. Kendi ayrıık problemlerini sürekli olacak şekilde gevşetebilirler ve neler olacağına bakabilirler.

Davet problemi örneğinde, bu problemi ayrııktan sürekli bir optimizasyon problemine gevşetmek, bize bir kişiye çeyrek davetiye, bir başkasına da $2/3$ davetiye göndermemizi söyleyebilen bir çözüm anlamına gelir. Elbette ki açık bir şekilde orijinal problemin bir çözümü olamaz fakat tıpkı en kısa örten ağaç gibi bize bir başlangıç noktası sunar. Elimizdeki gevşetilmiş sonuçla bu kesirleri gerçek yaşama nasıl aktarabileceğimizi düşünebiliriz. Örneğin bu sayıları gerektiği şekilde basitçe yuvarlamayı tercih edebilir ve “yarım davetiye” alan herkese bir davetiye gönderebiliriz. Bu kesirleri olasılıklar olarak da yorumlayabiliriz. Örneğin gevşetilmiş çözümün yarım itfaiye aracı koymamızı söylediği her nokta için yazı tura atabilir ve sadece tura gelen yerlere bir araç koyabiliriz. Her iki durumda da orijinal ayrıık problemimiz bağlamında bir çözüm elde etmiş oluruz.

Her gevşetme işleminde olduğu gibi burada da son adım, orijinal problemi çözmek için tüm kaynakları seferber ettiğimizde elde edebileceğimiz gerçek en iyi çözümle kıyaslandığında elimizdeki çözümün ne kadar iyi olduğunu sorgulamaktır. Davetiye problemi için yuvarlamayla birlikte yapılan Sürekli Gevşetmenin kötü olmayan bir çözüm verdiği görülmektedir. En iyi çözümle elde edilecek minimum davetiye sayısının en fazla iki katı kadar davetiye göndererek istediğiniz herkesi partiye davet etmeniz matematiksel olarak garanti edilmiş durumdadır. Benzer şekilde itfaiye araçları probleminde olasılıklı Sürekli Gevşetme bizi süratle optimal çözümün yakınlarına götürmektedir.

Sürekli Gevşetme sihirli bir değnek değildir. Gerçekten optimal cevaplara ulaşmamız için bize verimli bir yol göstermemektedir, sadece optimal sonuçlara yakın yerlere bizi ulaştırır. Fakat optimalin iki katı posta göndermek ya da iki katı aşı yapmak yine de optimize edilmemiş alternatiflerden açık ara daha iyidir.

Sadece Aşırı Hız Cezası: Lagrange Gevşetmesi (Lagrangian Relaxation)

Vizzini: Anlaşılmaz!

Inigo Montoya: Sürekli olarak o kelimeyi kullanıyorsun.

Senin düşündüğün anlama geldiğini sanmıyorum.

—Prenses Gelin (*THE PRINCESS BRIDE*)

Brian çocukken bir gün annesine yapmak zorunda olduğu şeylerden dert yanıyordu: Ödevleri, ev işleri... Annesi, “Teknik olarak hiçbir şey yapmak *zorunda* değilsin” diyerek yanıtladı. “Öğretmenlerinin dediklerini yapmak zorunda değilsin. Sana söylediklerimi yapmak zorunda değilsin. Kanunlara bile uymak zorunda değilsin. Her şeyin bir sonucu vardır ve sen bunlarla yüzleşmek isteyip istemediğine karar vermek zorundasın.”

Brian’ın çocuk aklı darmadağın olmuştu. Annesinin söyledikleri güçlü bir mesaj, sorumluluk ve ahlaki muhakeme açısından bir uyanış gibiydi. Aynı zamanda başka bir şeydi. **Lagrange Gevşetmesi** denilen güçlü bir hesaplama tekniğiydi. Lagrange Gevşetmesinin ardında yatan düşünce oldukça basittir. Bir optimizasyon probleminin iki bölümü vardır: Kurallar ve sonuçlar. Lagrange Gevşetmesinde problemin kısıtlarının bazılarını alır ve bunları sonuç kısmına yediririz. Yani imkânsız alırız ve bunu maliyetli sınıfına indirgeriz. (Örneğin bir düğün oturma planı optimizasyonunda her masanın en fazla 10 kişi alması kısıtını bırakılacak dirsek aralığı boşluğu cezaları ekleyerek gevşetebiliriz.) Bir optimizasyon probleminin kısıtları “Yap, yoksa...” dediğinde Lagrange Gevşetme şöyle karşılık verir: “Ya yapmazsam?” Boyama yaptığımız fırçamızı sınır çizgilerinin dışına, çok az dışına bile olsa taşırsanız (çok büyük bir maliyetle bile olsa) daha önce çözülebilir olmayan problemler çözülebilir hâle gelir.

Lagrange Gevşetmeleri seyyar satıcı problemi ve bilgisayar

bilimindeki diğer zor problemler hakkındaki teorik literatürün büyük bir parçasıdır. Aynı zamanda birtakım pratik uygulamalar için önemli bir araçtır. Örneğin 3'üncü bölümde bahsettiğimiz, Beyzbol ligi ve bazı NCAA aktiviteleri için planlama sorumlusu olan Carnegie Mellon'dan Michael Trick'i hatırlayın. Bahsetmediğimiz şey, onun bunları nasıl yaptığıydı. Her yılın fikstürünü oluşturmak dev bir ayırık optimizasyon problemidir ve o hâliyle herhangi bir bilgisayarın çözebileceğinden çok daha karmaşıktır. Trick ve Sports Scheduling Group'taki meslektaşları her sene bu işi yapmak için Lagrange Gevşetmesine başvurmaktadır. Televizyonu açtığınız ya da bir stadyumda bir koltuğa oturduğunuzda o an o takımların tam da o sahada olmalarının... Tamam, tamam. Tam olarak optimum fikstür değildir ama optimale yakındır. Ve bu nedenle sadece Michael Trick'e değil, aynı zamanda 18'inci yüzyıl Fransız Matematikçi Joseph-Louis Lagrange'a da teşekkür etmemiz gerekir.

Bir spor sezonunun fikstürünü oluştururken Trick, yukarıda bahsetmiş olduğumuz Sürekli Gevşetme işleminin onun hayatını çok kolaylaştırmadığını fark etti. “Eğer sonuçta elinizde küsuratlı maçlar kalıyorsa aslında elinizde işe yarayan hiçbir şey yoktur.” Gerekli olduğunda yuvarlama işlemi yapabileceğiniz bir parti davetiyesi ya da itfaiye araçları probleminde elinizde küsuratlı sonuç kalması başka bir şeydir. Ancak spor müsabakalarında tam sayı kısıtları -ya da kaç takımın maç oynadığı, toplamda kaç karşılaşma olduğu ve her bir takımın bir diğeriyle kaç kere karşılaştığı- çok sıkı kısıtlardır. “Ve bu nedenle bu şekilde (sürekli gevşetme) bir gevşetme uygulayamayız. Modelin temel [ayırık] kısmını korumamız gerekir.”

Problemin tüm karmaşıklığını hesaba katmak adına bir şeyin yapılması gereklidir. Bu nedenle “spor ligleriyle birlikte, gevşetmek isteyecekleri bazı kısıtlar konusunda birlikte çalışmak zorunda oluruz.” Bir spor sezonunun fikstürünü oluştururken bura-

ya dâhil olan bu tarz kısıtların sayısı oldukça fazladır ve sadece ligin temel yapısından kaynaklanan gereksinimleri değil, aynı zamanda her türden kendine has istek ve rahatsızlıkları içerir. Bazı ligler sezonun ikinci yarısının ilk yarısının birebir aynısı olmasından rahatsız olmaz, sadece ev sahibi ve deplasman takımları yer değiştirir. Fakat bazı ligler bu yapıyı istemez ve iki takımın diğer takımlarla karşılaşmadan ikinci kez karşılaşmasını da istemezler. Bazı ligler en büyük rekabetlerin sezonun sonunda olması konusunda ısrar eder. Bazı takımlar sahalarında aynı tarihe çakışan diğer müsabakalar nedeniyle belirli tarihlerde kendi evlerinde müsabaka yapmak istemezler. NCAA basketbol ligi örneğinde, Trick ayrıca oyunları yayınlayan televizyon kanallarından kaynaklanan kısıtları da göz önünde bulundurmak zorundadır. Televizyon kanalları hangi karşılaşmaların “A maçı” ve “B maçı” olacağını -yani en fazla seyirciyi çekecek maçlar- bir yıl önceden belirlerler. (Örneğin Duke-UNC maçı, yılda bir kez olan A maçıdır.) Kanallar daha sonra her hafta bir A maçı ve bir de B maçı olmasını ama aynı anda iki A maçı olmamasını ve böylece izleyiciyi bölmemeyi beklerler.

Elbette ki çok da şaşırtıcı olmayan bir şekilde Trick, bir fikstürü oluşturmanın ancak bu sıkı kısıtlardan bazılarını yumuşatarak mümkün olabileceğini tespit etmiştir.

Genel olarak, insanlar bize bir fikstür için geldiklerinde “Asla X ve Y’yi yapmıyoruz” iddiasında bulunurlar. Daha sonra fikstürlerine bakar ve şöyle deriz: “Geçen sene üç kez X, iki kez de Y yapmışsınız.” O zaman da “Tamam, ondan başka yapmıyoruz” derler. Daha sonra bir önceki sezona gideriz... Genellikle insanların asla yapmadıklarını düşündükleri ama yaptıkları bazı şeyler olduğunu görürüz. Beyzbolda insanlar, Yankeeler ile Mets takımlarının asla aynı anda ev sahibi olarak oynamadıklarını düşünürler. Bu gerçek değildir. Asla da

gerçek olmamıştır. Bir sene içerisinde bazen üç, bazen de altı kez aynı gün içinde ev sahibi olarak maç yapmışlardır. Uzun bir sezonda, her takım ev sahibi olarak 81 oyun oynadığı için bu nispeten nadir sayılır ve insanlar bunu unuttur.

Bu durum arada sırada diplomatik bir beceri gerektirir fakat bazı imkânsızlıkların cezalara, hayal edilemez olanın da istenmeyene indirildiği bir Lagrange Gevşetmesi ilerleme kaydedilmesini sağlar. Trick'in de dediği gibi, çok uzun süreleri ulaşmaz bir kusursuz cevap uğruna harcamak yerine Lagrange Gevşetmesini kullanmak onun "Ne kadar yaklaşabilirsin?" gibi sorular sormasını sağlamaktadır. Sonuçta herkesin mutlu olmasını sağlayacak ve Mart Çılgınlığının meşalesini her yıl art arda ateşleyecek kadar yaklaşılabilmektedir.

Gevşetmeyi Öğrenmek

Hesaplama problemlerinin kendilerini bizlere gösterdikleri birçok farklı yolun arasında optimizasyon problemleri -bir tarafı hedefler, bir tarafı kurallar olan- muhtemelen en yaygın olanlarıdır. Ve seçeneklerimizin keskin bir şekilde ya/ya olduğu ve ara bir yolun olmadığı *ayrık* optimizasyon problemleri bunların en yaygın olanlarıdır. Burada, bilgisayar bilimi iç karartıcı bir durumu da miras olarak yanında getirmektedir. Birçok ayrık optimizasyon problemi gerçekten çok zordur. Alandaki en büyük zekâlar kusursuz cevaplara giden kolay bir yol bulma çabalarının her birinden elleri boş dönmüşlerdir ve aslında bu yolları aramaktansa gittikçe artan bir şekilde böyle yolların var olmadığını kanıtlamaya kendilerini daha çok adanmışlardır.

Başka hiçbir şey olmasa da bu durum bize en azından teselli vermelidir. Eğer dikenli, dalı budaklı ve geçilmez gibi görünen bir problemin karşındaysak, doğru yolda olabiliriz. Ve burada bir bilgisayarımızın olması onun çözeceği anlamına gelmez.

En azından, nasıl gevşetme yapacağımızı öğrenmediğimiz sürece.

Bir problemi gevşetmenin pek çok yolu vardır ve bunların en önemli üç tanesini şu ana kadar gördük. İlk olarak Kısıt Gevşetmesi basit bir şekilde bazı kısıtları tamamen kaldırır ve gerçek hâline dönmenden önce gevşetilmiş problem şeklinde bir ilerleme sağlar. İkinci olarak, Sürekli Gevşetme kesikli ya da bir-sıfır seçeneklerini sürekli forma dönüştürür. Buzlu çay ile limonata arasında seçim yapmadan önce arada bir karışım da karar kılın ve daha sonra bu değeri aşağı ya da yukarıya yuvarlayın. Üçüncü olarak ise Lagrange Gevşetmesi imkânsız olan şeyleri kuralları esnetme (ya da onları çiğneme ve sonuçlarına katlanma) sanatını öğreterek cezalara dönüştürür. Örneğin belirli ve sınırlı bir zaman aralığına hangi şarkıları sıkıştıracağına karar veren bir rock grubu bilgisayar mühendislerinin “sırt çantası problemi (knapsack problem)” dedikleri şeyle karşı karşıyadır. Bir kişiden sınırlı bir hacme sahip alana, farklı boyut ve öneme sahip şeyleri düzenli olarak doldurmasını isteyen bir bulmacadır. Sırt çantası problemi çok sıkı yapısıyla çözümsüz olarak ünlenmiştir fakat bu bizim gevşetilmiş rock yıldızlarımızın moralini bozmamalıdır. Birçok ünlü örnekte de gösterilmiş olduğu gibi, bazen sokağa çıkma yasağını biraz delip dışarıda kalmak ve cezalara katlanmak, konseri mevcut sınırlarla vermekten daha iyidir. Aslında, kuralları çiğnemeseniz bile sadece bunu *hayal etmek* bile aydınlatıcı olabilmektedir.

İngiliz muhafazakâr köşe yazarı Christopher Brooker “ne zaman isteklerimizle yönlendirilen düşüncelerimiz doğrultusunda bir hareket tarzı seçersek, her şey bir süreliğine iyi gidiyor gibi görünebilir ama bu yap ve inan olayı hiçbir zaman gerçeklikle uzlaşamayacağı için kaçınılmaz bir şekilde çok safhalı bir çöküşe neden olacaktır; rüya-hüsran-kâbus-patlama” demektedir. Bilgisayar bilimi çok daha toz pembe bir tablo çizmektedir. Bu-

rada da bir optimizasyon tekniği olarak gevşetme, tamamen bilinçli olarak isteklerimizle yönlendirilen düşünceyle ilgilidir. Bu belki de kısmen farkı yaratan şeydir.

Gevşetme bize birtakım avantajlar sunmaktadır. İlk olarak gerçek çözümün kalitesi üzerinde bir sınır sunar. Eğer takvimimizi düzenlemeye çalışıyorsak, şehirde ışınlanarak seyahat edebileceğimizi hayal etmek, bir gün içerisinde en fazla sekiz tane bir saatlik toplantı yapabileceğimizi anında gözlerimizin önüne serer. Böylesi bir sınır, tüm problemle yüzleşmeden önce beklentilerimizi belirlememizde faydalı olabilir. İkinci olarak gevşetmeler gerçeklikle aynı çizgide buluşabilecek şekilde tasarlanmıştır ve bu bize çözümün diğer tarafından sınırlar sağlar. Sürekli Gevşetme bize küsuratlı aşı dağıtmamıza izin verdiğinde, biz de yarım ya da daha fazla aşı tahsis edilen herkesi aşılayabilir ve kolaylıkla en kötü ihtimalle kusursuz bir çözümün iki katı sayıda aşı yapabiliriz. Bu çok da kötü bir durum değildir ve bununla yaşayabiliriz.

Her pürüzle karşılaştığımızda kusursuzluk için çok fazla zaman harcamak niyetinde değilsek, zorlu problemler patinaj yapmamız yerine problemlerin daha kolay versiyonlarını düşünüp önce bunları halletmemizi gerektirir. Bu taktik doğru bir şekilde uygulandığında sadece fantezi, arzularımıza göre düşünmek ya da boş boş hayal kurmak demek değildir. İlerleme kaydetmemizin en iyi yollarından biridir.

Rastlantısallık (Randomness)

Ne Zaman Şansa Bırakmalı?

Bu alanda uzun seneler çalışmam sonucunda, rastlantısallığın algoritmik problemlere olan büyük faydalarının bana çok gizemli geldiğini itiraf etmeliyim. Etkilidir ve işe yaramaktadır ama neden ve nasıl olduğu tamamen gizemlidir.

—Michael RABIN

Rastlantısallık mantığa terstir. Bir problem üzerinde çalışırken ümitsizliğe düşüldüğünde başvurulacak son mercidir. Aslında, bu tanımlarla uzaktan yakından alakası yoktur. Rastlantısallık, bilgisayar bilimindeki şaşırtıcı ve giderek artan önemli rolüyle bize şans faktöründen faydalanarak en zorlu problemlere yaklaşmanın bilinçli ve etkili bir yolu olabileceğini gösterir. Aslında, işi şansa bırakmaktan başka hiçbir çarenin olmadığı zamanlar vardır.

Bilgisayarların kullandığını düşündüğümüz, belirli bir adımın bir başka adımı tam olarak aynı şekilde takip ettiği standart “deterministik” algoritmaların aksine rastlantısal algoritma, bir problemi çözmek için rastgele üretilen sayıları kullanır. Bilgisayar biliminde son zamanlardaki çalışmalar rastlantısal algo-

ritmaların zor sorulara diğer bilinen tüm deterministik algoritmalarından daha hızlı ve iyiye yakın cevaplar üretebildiği durumların olduğunu göstermiştir. Ve her zaman optimal çözümleri garanti etmemelerine karşın rastlantısal algoritmalar, deterministik kuzenleri terlerken sadece birkaç yazı tura atışıyla optimal çözümlere şaşırtıcı bir şekilde çok kısa süreler içinde oldukça yaklaşılabirler.

Belirli problemlerde rastlantısal algoritmaların en iyi deterministik yaklaşımları bile geride bırakmalarında derin bir mesaj bulunmaktadır. Bazen bir problem için en iyi çözüm bir cevabı, tamamen mantık içerisinde aramaktansa şansa bırakmaktır.

Rastlantısallığın sadece faydalı olabileceğini bilmek yeterli değildir. Ne zaman şansa güvenmeniz gerektiğini, bunu nasıl yapacağınızı ve nereye kadar yapacağınızı bilmeniz gerekir. Bilgisayar biliminin yakın tarihi buna bazı cevaplar sunmaktadır. Bu konudaki hikâyemiz birkaç asır önce başlamaktadır.

Örnekleme

1777’de George-Louis Leclerc, Comte de Buffon ilgi çekici bir olasılık analizinin sonuçlarını yayınladı. Eğer çizgili defter sayfasının üzerine bir toplu iğneyi düşürürsek bunun çizgilerden birini kesmesinin ne kadar muhtemel olduğunu sordu. Buffon’un çalışması eğer iğnenin boyu çizgilerin arasındaki boşluklardan daha kısa ise cevabın [(iğnenin boyu)/(çizgiler arası fark)]x(2/pi) olduğunu gösterdi. Buffon için bu formülü elde etmek yeterliydi. 1812’de kitabın 6’ncı bölümünün kahramanlarından Pierre-Simon Laplace bu sonucun bir başka uygulamasının daha olduğuna işaret etmişti. Bir kişi pi sayısının değerini sadece bir kâğıt üzerine iğneler bırakarak tahmin edebilirdi.

Laplace’ın ileri sürdüğü şey, genel ve önemli bir gerçeğe işaret ediyordu. Karmaşık bir yığınla ilgili bir şeyler bilmek istediğimizde değerini ondan *örneklem* olarak tahmin edebiliriz. Bu,

tam da Laplace'ın Bayes Kuralı üzerine olan çalışmasının bize yardımcı olacağı türdendir. Aslında Laplace'ın önerisini takip ederek birçok kişi onun önerdiği deneyi uygulamış ve -verimli bir yöntem olmasa da- pi'nin değerini bu uygulamalı yöntemle tahmin etmenin mümkün olduğunu doğrulamışlardır.*

Çizgili bir sayfa üzerine binlerce toplu iğne atmak bazıları için geçmişte ilginç olmuş olabilir fakat örneklemeyi pratik bir yöntem hâline getirmek bilgisayarlar sayesinde oldu. Daha önce-leri, matematikçiler ve fizikçiler, rastlantısallığı problemlerini çözmek için kullanmayı denediklerinde hesaplamaları yorucu bir şekilde elle yapmak zorunda kalmışlardı ve bu nedenle kesin sonuç elde etmek için yeterli örneklem yaratmak zor olmuştu. Bilgisayarlar -tam olarak söylemek gerekirse İkinci dünya Savaşı sırasında Los Alamos'ta geliştirilen bilgisayar- bu konuda farkı yaratan şey oldu.

Stanislaw “Stan” Ulam, atom bombasının geliştirilmesine yardım eden matematikçilerden biriydi. Polonya’da büyüdükten sonra 1939’da ABD’ye göç etmiş ve 1943’te Manhattan Projesi’ne katılmıştı. Akademik dünyaya kısa bir geri dönüş yaptıktan sonra, 1946’da yeniden Alamos’ta termonükleer silahların tasarımı üzerinde çalışmaya başlamıştı. Aynı zamanda hastaydı. Ensefalit hastalığına yakalanmıştı ve acil beyin ameliyatı geçirdi. İyileşme sürecinde, matematik yeteneklerini yeniden geri kazanıp kazanamayacağı konusunda endişe etmeye başladı.

* Bu deneylerin bazıları çok ilginçtir ki şans faktöründen çok daha iyi bir şekilde pi sayısının değerini tahmin etmiş gibi görünmektedir ve bu da bilinçli bir şekilde iyi bir durma noktasında durdurulduklarını ya da tamamen öyle gösterildiklerini düşündürmektedir. Örneğin 1901’de İtalyan matematikçi Mario Lazzarini’nin 3.408 toplu iğne atışı yaptığı tahmin edilmektedir ve buna göre pi değerini $355/113=3,1415929$ olarak tahmin etmiştir. (pi sayısının yedi ondalıklı gerçek değeri 3,1415927’dir.) Ancak çizgiyi kesen sayı sadece bir atış farklı olsaydı tahmin daha uzak kalacaktı -3,1398 ya da 3,1433- ve bu da Lazzarini’nin raporuna şüpheyle yaklaşılmasına neden olmaktadır. Laplace, Bayes Kuralını bu sonucun geçerli bir deneyden gelmesinin mümkün olmadığını göstermek için kullanabileceğimizi tespit etmiş olabilir.

Ulam, toparlama dönemindeyken başta Soliter (aynı zamanda Klondike olarak bilinir) olmak üzere çok fazla kâğıt oyunu oynadı. Herhangi bir Soliter oyuncusunun bileceği gibi bazı kâğıt karmalarının sonucunda desteler kazanılamayacak oyunlar yaratır. Böylece Ulam, oynadıkça kendisine doğal bir soru sordu. Karıştırılan bir destenin kazanılabilir bir oyun ortaya koyma olasılığı nedir?

Soliter gibi bir oyunda olasılıklar uzayı içerisinde yolunuzu akıl yürüterek bulmanız neredeyse aşırı bunaltıcı bir iş hâline gelir. İlk kart açışınızda olabilecek 52 muhtemel oyun türü vardır; ikincide ise gelecek olan kart açısından 51 olasılık. Bu da daha oyuna başlamadan binlerce muhtemel oyun olasılığı içine girmiş olduğumuz anlamına gelir. F. Scott Fitzgerald, bir keresinde şöyle yazmıştı: “Birinci sınıf bir zekânın testi, iki karşıt fikri aynı anda akılda tutmak ve bu hâlde işlevlerini sürdürebilme yeteneğini korumaktır.” Bu gerçek olabilir fakat hiçbir birinci sınıf insan ya da başka bir varlığın zekâsı 80 unvigintillion (10^{66}) olası oyun kâğıdı sırasını aklında tutup aynı zamanda işlevsellik umuduna sahip olamaz.

Ulam, bu konuda bazı detaylı kombinasyon hesaplamalarını denedikten ve pes ettikten sonra güzelliğini basitliğinden alan farklı bir yaklaşım kullandı: *Sadece oyunu oynamak*.

Çok dahâ pratik olabileceğini fark ettim... Tahmin etmenin bir yolunun olmadığı şekilde üstel olarak artan sayıdaki tüm kombinasyon olasılıklarını hesaplamaya çalışmak yerine kartları dağıtmak ya da süreçle deneyler yaparak sadece başarılı ellerin oranını tespit etmek. Bu durum entelektüel açıdan şaşırtıcıdır ve tam olarak küçük düşürücü olmasa da insana akılcı ya da geleneksel düşünmenin sınırları hakkında tevazu duygusunu yaşatmaktadır. Yeteri kadar karmaşık bir prob-

lemde gerçek örneklem tüm zincirleme olasılıkları incelemekten daha iyidir.

Burada “daha iyi” dediğinde örneklemenin size yorucu analizlerden daha net cevaplar sunacağını anlatmaya çalışmadığına dikkat edin. Örneklem süreciyle ilişkili her zaman bir hata olacaktır lakin siz bunu örneklemenizin gerçekten rastlantısal olduğundan emin olarak ve daha fazla örneklem alarak azaltabilirsiniz. Onun kastettiği şey, örneklem daha iyidir çünkü başka hiçbir şeyin size cevaplar sunmadığı bazı durumlarda size en azından bir cevap sağlar.

Ulam’ın görüşü -analizin başarısız olduğu yerde örneklem başarılı olabileceği- aynı zamanda Los Alamos’ta ortaya çıkan zorlu nükleer fizik problemlerinden bazılarını çözmek için de çok önemliydi. Nükleer bir reaksiyon dallanan bir süreçtir. Olasılıklar kartlarda olduğu gibi çılgınca katlanarak artar; bir parça ikiye bölünür, bunların her biri diğerlerine çarparak parçalanmasına neden olur ve bu böyle devam eder. Bu sürecin, çok fazla parçacık etkileşim hâlindeyken belirli çıktılarının olasılıklarını hesaplamak neredeyse imkânsız denecek kadar zordur. Fakat her bir etkileşim yeni bir kart açmak demektir gibi bunu simüle etmek bir alternatif sunmaktadır.

Ulam bu fikri, John von Neumann ile birlikte ileri götürdü ve Manhattan Projesi’nden bir diğer fizikçi olan Nicholas Metropolis ile metodu Los Alamos bilgisayarı üzerinde uygulama konusunda birlikte çalıştı. Metropolis bu yaklaşımı, şans çılgınlığına eşit bir şekilde bağlı Monaco’daki Monte Carlo kumarhanesinden esinlenerek **Monte Carlo Metodu** olarak adlandırdı. Los Alamos ekibi bunu nükleer fizikteki problemleri çözmede kullanmayı başardı. Bugün Monte Carlo Metodu bilimsel hesaplama yöntemlerinin mihenk taşlarından birisidir.

Atomun alt parçalarının etkileşimlerini ya da Soliter’de kazanma şansını hesaplamak gibi bu problemlerin çoğu olasılık şeklindedir. Bu nedenle onları Monte Carlo gibi rastlantısal bir yaklaşım aracılığıyla çözmek akla yatkındır. Fakat belki de rastlantısallığın gücü hakkındaki en şaşırtıcı gerçek, şansın neredeyse hiç rolü yokmuş gibi görünen durumlarda kullanılabilir olmasıdır. Bir soruya kati bir şekilde evet-hayır ya da doğru-yanlış olarak cevap vermek istesenez bile -burada herhangi bir olasılık bulunmamaktadır- birkaç zar atmak hâlen çözümün bir bölümü olabilir.

Rastlantısal Algoritmalar

Rastlantısallığın bilgisayar bilimindeki şaşırtıcı derecede geniş uygulama alanını ilk gösteren kişi Michael Rabin’di. 1931 senesinde Breslau, Almanya’da (İkinci Dünya Savaşı sonunda Polonya’nın Wroclaw şehri olacaktı) dünyaya gelen Rabin, köklü bir haham soyundan gelmekteydi. Ailesi Almanya’ya gelmek üzere Filistin’den 1935’te ayrılmıştı ve burada babasının çizdiği hahamlık yolundan matematiğin güzelliği nedeniyle çıkmıştı. Hebrew Üniversitesi’ndeki öğreniminin başlarında Alan Turing’in çalışmalarını keşfetmiş ve Princeton’da doktora eğitimine başlamak için ABD’ye göç etmişti. Rabin, bir makinenin tek seçeneği izlemek zorunda olmadığı, takip edebileceği birden fazla yol olan “deterministik olmayan” durumları da içine alacak şekilde teorik bilgisayar bilimini genişlettiği çalışmasıyla Nobel ödülünün bilgisayar alanındaki karşılığı olan Turing ödülünü alacaktı. Rabin 1975 tatilinde yeni bir araştırma istikameti bulmak için MIT’ye girdi.

Aradığı yönü, en eski problemlerden birinde buldu: Asal sayıların nasıl tanımlanacağı.

Asal sayıları bulmak için geliştirilen algoritmalar, en az matematikçilerin Eratosthenes süzgeci olarak adlandırdıkları basit

bir yaklaşım kullandıkları Eski Yunan çağına kadar uzanmaktadır. Eratosthenes Süzgeci şu şekilde işler: n sayısından daha küçük tüm asal sayıları bulmak için önce birden n 'e kadar tüm sayılar sırasıyla yazılır. Daha sonra ikinin kendisi hariç olmak üzere, katları olan tüm sayıların üzeri çizilir (4, 6, 8, 10, ...). Daha sonra üzeri çizilmemiş en küçük sayı alınır (bu durumda üç) ve bu sayının tüm katlarının üzeri çizilir (6, 9, 12, 15, ...). Bu şekilde devam edilir ve en sonda kalan sayılar asal sayılardır.

Asal sayılar üzerine çalışmak bin yıl süresince G. H. Hardy'nin de belirttiği gibi, matematiğin "açık bir şekilde en faydasız alanlarından biri" olarak görüldü. Ancak 20'nci yüzyılda kullanışlı sınıfına terfi etti ve kriptografi ve çevrim içi güvenlik konularında önemli bir hâl aldı. Daha sonraları anlaşıldı ki asal sayılarla çarpma işlemlerini yapmak, onları çarpanlarına ayırmaktan *çok daha* kolaydır. Yeteri kadar büyük asal sayılarla -diyelim ki 1.000 basamaklı- çarpma işlemi bir saniyenin çok küçük bir kesiminde yapılabilirken bu sayıyı çarpanlarına ayırmak kelimenin tam anlamıyla milyonlarca yıl sürebilir. Bu da "tek yönlü fonksiyon" denilen şeyi ortaya çıkarmaktadır. Örneğin, modern şifrelemede sadece gönderen ve alıcı tarafından bilinen gizli asal sayılar, herkese açık bir şekilde korkusuzca gönderilebilecek kadar büyük bir sayı elde edilmek üzere birbirleriyle çarpılırlar çünkü çıkan sonucu çarpanlarına ayırmak bu iletişimi takip etmeye çalışan birinin çok çok uzun olacak şekilde zamanını alacaktır. Bu nedenle ister ticaret, isterse bankacılık ya da e-posta olsun tamamen güvenli sanal iletişim asal sayı arayışlarıyla başlar.

Bu kriptografik uygulama birdenbire asal sayıları bulma ve kontrol etmek için olan algoritmaları inanılmaz derecede önemli kılmıştır. Ve Eratosthenes süzgeci etkili olmasına karşın verimli değildir. "Asallık" testi olarak bilinen adıyla belirli bir sayının asal olup olmadığını kontrol etmek isterseniz, süzgeç stratejisini

uygulamak o sayının kareköküne kadar olan tüm asal sayılarla bölmeye çalışmanızı gerektirir.* Altı basamaklı bir sayının asal olup olmadığını kontrol etmek, 1.000'den küçük 168 asal sayının tümüyle bölme yapmanızı gerektirir, çok da kötü değil. Ancak 12 basamaklı bir sayının asallığını kontrol etmek bir milyondan küçük 78.498 asal sayıyla bölümü içerir ve tüm bu bölme işlemleri süratle kontrolden çıkar. Modern kriptografide kullanılan asal sayılar, yüzlerce basamaklıdır. Bölme işlemi yapmayı unutun.

Rabin, MIT'de Berkeley'den bilgisayar bölümünden henüz mezun olmuş Gary Miller ile tanıştı. Miller doktora tezinde ilgi çekici bir şekilde umut vadeden, asallığı kontrol için oldukça hızlı bir algoritma geliştirmişti fakat küçük bir sorun vardı: Her zaman işe yaramıyordu.

Miller eğer n asal ise, x 'e her ne değer verirsiniz verin her zaman doğru olan bir dizi eşitlik (n ve x cinsinden iki rakamla ifade edilen) bulmuştu. Eğer sadece bir x değeri için bile eşitlikler hatalıysa, n 'in asal olmasının hiçbir yolu yoktur. Bu durumlarda x 'e asallığın karışıt şahidi denilmektedir. Fakat buradaki sorun hatalı çıkan pozitif sonuçlardır: n asal olmasa bile, eşitlikler bazı seferlerde doğru sonuç vermektedir. Bu durum Miller'ın yaklaşımını askıda bırakıyordu.

Rabin bu noktanın, alışıldık deterministik bilgisayar biliminin dışında bir adımın değerli olabileceği bir yer olduğunu fark etti. Eğer n sayısı gerçekten asal değilse, x 'in kaç değişik olası değeri hatalı bir pozitif sonuç verir ve n 'i asal olarak ilan eder? Rabin cevabın çeyrekten daha fazla olmadığını gösterdi. Böylece x 'in rastgele bir değeri için, eğer Miller'ın eşitlikleri doğru çıkıyorsa

* Karekökünden daha ilerisini kontrol etmenize gerek yoktur çünkü eğer bir sayının karekökünden daha büyük bir çarpanı var ise o sayının buna karşılık gelen bir çarpanının karekökünden küçük olarak da var olması gerekir ve siz ona zaten çoktan rastlamışsınızdır. Örneğin eğer 100'ün çarpanlarını arıyorsanız, 10'dan büyük her çarpan 10'dan küçük bir çarpanla mutlaka eşleşecektir: 20 çarpanı beş ile, 25 çarpanı dört ile gibi.

n 'in gerçekten asal olmama olasılığı sadece dörtte bir kadardı. Ve daha da önemli olacak şekilde, rastgele yeni bir x değeri seçtiğimiz ve eşitliklerin doğru çıktığı her seferinde, n sayısının asal gibi görünmesi fakat aslında öyle olmaması olasılığı dört kat daha azalır. Bunu 10 kez tekrar ederseniz hatalı bir pozitif çıkma olasılığı $1/4$ 'ün 10 uncu kuvveti kadardır, yani milyonda birden daha az. Yeteri kadar kesin değil mi? Beş kez daha bunu tekrarlayın ve bu değeri milyarda bire düşürün.

MIT'den bir başka bilgisayar mühendisi olan Vaughan Pratt, Rabin'in algoritmasını uyguladı ve bir kış gecesinin geç saatlerinde sonuçları almaya başladı. Bu sırada bir Hanukkah partisi için arkadaşlarını evinde ağırlamakta olan Rabin gece yarısı civarlarında telefon geldiğini hatırlıyor:

“Michael, benim Vaughan. Şu deneylerden gelen sonuçları alıyorum. Eline bir kalem al ve dediklerimi yaz.” Sonuçlarda şunu elde etmişti: $2^{400}-593$ asaldır. 300'den küçük olan tüm asal p sayılarının çarpımı k ile gösterilsin. $(k \times 338 + 821)$ ve $(k \times 338 + 823)$ sayıları asal ikizlerdir. Bunlar o zamanlar bilinen en büyük ikiz asal sayılar olmuştu. Tüylerim diken diken oldu. İnanılmazdı. Sadece inanılmaz.*

Şimdilerde bilinen adı ile Miller-Rabin asallık testi, belirlenen bir kesinlik düzeyinde çok büyük bile olsa asal sayıları çok hızlı bir şekilde tanımlamak için bir yol sunmaktadır.

Burada, “olmanın” ne anlama geldiği hakkında felsefi bir soru sorabiliriz. Matematiğin bir kesinlik âlemi olması durumuna o kadar alışkınız ki bir sayının “muhtemelen asal” olabilmesi ya da “neredeyse kesin asal” olabilmesi düşüncesi oldukça sarsıcıdır. Ne kadar kesinlik, yeteri kadar kesindir? Uygulamada internet bağlantılarını ve dijital işlemleri şifreleyen modern krip-

* Asal ikizler; asal olan ardışık tek sayılardır. 5 ve 7 gibi.

tografi sistemleri, bir milyon x milyar x milyarda bir olasılığında hatalı bir pozitif sonucuna göre ayarlanır. Diğer bir deyişle bu olasılık virgülden sonra 24 sıfır olan bir ondalıklı sayıdır. Dünyadaki kum tanelerinden birinden daha az bir olasılıkla hatalı bir sonuç verebilir. Bu standarda Miller-Rabin testinin sadece 40 kez uygulanmasından sonra ulaşılmaktadır. Asla tam olarak emin olmadığınız doğrudur lakin buna çok çok yaklaşabilirsiniz; hem de çok çok kısa bir sürede.

Siz Miller-Rabin testini hiç duymamış olsanız da dizüstü bilgisayarınız, tabletiniz ve telefonunuz bu testi iyi bilmektedir. Keşfinden onlarca yıl sonra hâlen birçok alanda asal sayıları bulmak ve kontrol etmek için standart metottur. Kredi kartınızı internette kullandığınız her seferinde güvenli iletişim (kablolu ya da kablosuz olarak) sahne arkasında işlemektedir.

Miller ve Rabin'in çalışmasının üzerinden geçen onlarca sene boyunca asallığı deterministik bir şekilde, mutlak bir kesinlikle test etmeyi sağlayacak etkili bir algoritmanın olup olmayacağı bilinmiyordu. 2002'de böyle bir metot Hindistan Teknoloji Enstitüsü'nden Manindra Agrawal, Neeraj Kayal ve Nitin Saxena tarafından keşfedildi fakat Miller-Rabin gibi rastlantısal algoritmalar çok daha hızlı ve bu nedenle günümüzde uygulamada kullanılanlardır.

Ve bazı problemler için rastlantısallık etkin çözümler için hâlen bilinen tek yoldur. Matematik alanından ender bir örnek "polinom eşitlik testi" olarak bilinmektedir. Eğer $[2x^3+13x^2+22x+8]$ ve $[(2x+1)(x+2)(x+4)]$ gibi iki polinom ifadeniz varsa, bu iki ifadenin aslında aynı fonksiyon olup olmadığını tespiti çalışmak -tüm bu çarpma işlemlerini yapmak ve daha sonra sonuçları karşılaştırmak- inanılmaz derecede zaman harcamaya neden olabilir, özellikle de değişkenlerin sayısı arttıkça.

Burada yine rastlantısallık ileriye doğru bir yol göstermektedir. Sadece rastgele x 'ler üretin ve bunları ifadelerdeki yerlerine

koyun. Eğer iki ifade aynı değilse, rastgele üretilen girdiler için aynı sonucu vermeleri çok büyük bir tesadüf olacaktır. Ve ikinci bir rastgele girdi için yine aynı sonuçları vermeleri daha büyük bir tesadüf olacaktır. Ve eğer üçüncü bir rastgele girdi sonucu cevap aynı olursa yine daha da büyük bir tesadüf olacaktır. Polinom eşitliğini test etmek için bilinen deterministik bir algoritma mevcut olmadığı için bu rastlantısal metot -birden çok gözlemin süratle kesine yakın sonuç verdiği- elimizdeki tek pratik metottur.

Örneklemenin İyi Yönleri

Polinom eşitlik testi bazen emeklerimizi rassal değerleri hakkında bilgi elde etmek istediğimiz iki ifadeden örnekler ararken harcamanın bu ifadelerin iç yapısına kafa yormaktan daha iyi olduğunu gösterir. Bir noktaya kadar bu durum makul bir biçimde içgüdüselidir. Sıradan iki cihazı alıp birbirlerinden farklı iki araç mı yoksa birbirlerinin tamamen aynıları mı olduğu sorulduğunda birçoğumuz bunların gövdelerini açıp içindeki parçalara bakmaktansa rastgele üzerlerindeki düğmelere basarız. Ve ayrıca televizyon ekranında gördüğümüz bir uyuşturucu patronunun paketlerden birine bıçağını batırarak malların tamamının kalite kontrolünü yapmasına da şaşırırmamaktayız.

Bazen rastlantısallığa başvurmadığımız durumlar da vardır. Bu durumlarda da belki de rastlantısallığa başvurmalıyız.

20'nci yüzyılın belki de en önemli siyasi filozofu, alanındaki iki zıt görüşü -özgürlük ve eşitlik- uzlaştırmaya baş koymuş Harvard'dan John Rawls'tır. Bir toplum özgür olduğunda mı daha "adil" olur yoksa eşit olduğunda mı? Bu iki görüş gerçekten birbirlerinden ayrı olmak zorunda mıdır? Rawls bu sorulara yaklaşmak için adına "cehalet örtüsü (veil of ignorance)" dediği bir yol önerdi. Doğmak üzere olduğunuzu ama kim olarak doğacağınızı bilmediğinizi hayal etmenizi söylemiştir: Erkek ya da kadın,

zengin ya da fakir, şehirde ya da kırsalda, hasta ya da sağlıklı. Ve durumunuzu öğrenmeden önce hangi türden bir toplulukta yaşayacağınızı seçmek zorundasınız. Ne isterdiniz? Rawls cehalet örtüsünün ardından çeşitli sosyal düzenlemeleri inceleyerek ideal bir insanın nasıl görünmesi gerektiği konusunda daha çabuk fikir birliğine ulaşabileceğimizi ileri sürmüştür.

Fakat Rawls'ın düşünce deneyinin hesaba katmadığı şey, böylesine örtü gerisinden bir toplumu anlamaya çalışmanın bilişimsel maliyetidir. Varsayımsal bir senaryoda tüm bilgileri kafamızda tutmayı nasıl umabiliriz? Bir dakikalığına adalet ve dürüstlük konusundaki büyük soruları bir kenara bırakın ve Rawls'ın yaklaşımını sadece sağlık sigortası düzenlemelerindeki bir değişiklik teklifine uygulayın. Doğduktan sonra bir kişinin ülkenin batısında memur olma olasılığını alın ve bunu hükümet çalışanları için olan farklı sağlık güvence planlarının dağılımları ile çarpın. Daha sonra bu sonucu bir kemiğinin kırılma olasılığına ait verilerden elde edilen olasılıkla çarpın, çıkan sonucu da sağlık güvencesi planlarını göz önüne alarak batıdaki bir hastanede bu hastalığın tedavisine yönelik fatura miktarıyla çarpın... Tamam, sigorta değişiklik teklifinin ülke için “iyi” olduğunu mu yoksa “kötü” olduğunu mu söylersiniz? Bu durumda bırakın yüz milyonlarca kişinin hayatını, sadece tek rahatsızlıktan bahsediyoruz.

Rawls'ı felsefi bakımdan eleştirenler, cehalet örtüsünün ardından elde edilen bilgiyi tam olarak nasıl kullanacağımız konusunda tartışmalarda bulunmuşlardır. Örneğin, mutluluğun ortalamasını mı, medyanını mı, toplamını mı yoksa başka bir ölçütünü mü maksimize etmeye çalışmalıyız? Bu yaklaşımların her biri oldukça bilindik bir şekilde kendilerini ütopyalarda ortaya koymuşlardır. Tıpkı refah ve uyumun oldukça yaygın olduğu ama insanların tek çocuk sahibi olmaya zorlandığı ve mutsuzlukla yaşadığı yazar Ursula K. Le Guin'in Omelas medeniyetinde ol-

duğu gibi... Bunlar yerinde eleştirilerdir ve Rawls örtünün ardından elde ettiğimiz bilgiyle ne yapacağımız sorusunu cevapsız bırakarak bilinçli bir şekilde bu eleştirilerin etrafından dolaşmaktadır. Belki de daha önemli olan soru, bu bilginin ilk olarak nasıl toplanacağıdır.

Bu sorunun cevabını pekâlâ bilgisayar bilimi verebilir. MIT'den Scott Aaronson bilgisayar mühendislerinin şimdiye kadar felsefe üzerinde bir etkilerinin olmamasına şaşırdığını söylemektedir. Bunun nedeninin sadece “felsefenin kavramsal literatürüne ne ekleyebilecekleri konusunda birbirleriyle *iletişime geçememeleri*” olduğundan şüphe etmektedir. Konuyla ilgili ayrıntıları şu şekilde vermektedir:

Bir kişi, bir şeyin hesaplanabilir olduğunu bildiği zaman, hesaplamanın 10 ya da 20 saniye sürmesinin açık bir şekilde filozoflardan ziyade mühendislerin derdi olduğunu bilir. Fakat söz konusu zaman $(10^{10})^{10}$ saniye olsa, bu sonuca bu kadar kolay varamazdı! Ve aslında, karmaşıklık teorisinde dikkate aldığımız nicel farklar genellikle o kadar geniştir ki bir kişi bunları aynı zamanda nitel farklar olarak da göz önüne almalıdır. Mesela, 400 sayfalık bir kitabı okumak ile dünya üzerindeki tüm kitapları okumayı düşünün ya da 1.000 basamaklı bir sayıyı yazmak ile bu sayıya kadar saymayı.

Bilgisayar bilimi bizlere kırık bir kemik örneğinde olduğu gibi, bir şeyin tüm sosyal yanlarını değerlendirmenin karmaşıklığını düşünmek için bir yol sunar. Bununla birlikte bu karmaşıklıkla uğraşmak için araçlar da verir. Ve örneklem tabanlı Monte Carlo algoritmaları bu alet kutusundaki en faydalı yaklaşımlardan bazılarıdır.

Örneğin, hâlen bile anlaşılması çok karmaşık olan ulusal sağlık güvence sistemi reformunu anlamamız için siyasi liderlerimiz

genel olarak bize iki şey önermektedir: Özenle seçilmiş kişisel anekdotlar ya da toplu istatistikler. Anekdotlar elbette ki zengin ve canlıdır fakat temsili değillerdir. Hemen hemen tüm yasalar, ne kadar bilgili şekilde hazırlanmış ya da yanlış istikamette olursa olsun, bazıları için iyi bazıları için kötü olacaktır. Bu nedenle dikkatlice seçilen hikâyeler daha geniş alanlar için bir bakış açısına sahip olmaz. Diğer taraftan toplu istatistikler ise bunun tam tersidir. Kapsamlı ama incedir. Örneğin ortalamaların ulus genelinde kaç olduğunu öğrenebiliriz fakat değişikliklerin daha aşağılarda nasıl işe yaradığını öğrenemeyiz. Birçok kişi için iyi giderken bazı grupları -örneğin Alaskalıları ya da hamile kadınları- çok kötü ve zor durumlarda bırakabilir. Bir istatistik bize hikâyenin sadece bir kısmını, altta yatan farklılıkları gizleyerek anlatabilir. Ve genellikle hangi istatistiğe ihtiyacımız olduğunu bile bilmeyiz.

Ne istatistikler ne de siyasilerin hikâyeleri bize bir kanun tekليفinin binlerce sayfası arasında gerçekten yol gösteremeyeceği için Monte Carlo bilen bir bilim adamı bize farklı bir yaklaşım önerebilir: Örneklem. Rastgele alınan örneklemelerin dikkatlice incelenmesi aşırı derecede karmaşık olan bir şeyi anlamak için en etkin yollardan biri olabilir. İş, nitel olarak yönetilemez bir problem, Soliter, atomik füzyon, asallık testi ya da kamu politikaları gibi bir bütün hâlinde anlaşılması zor ve çetrefilli bir konu ile ilgilenmek olduğunda örneklem üzerinde çalışmak; zorlukları aşmak için en basit ve aynı zamanda en iyi yollardan birini sunar.

Bu yaklaşımı, Kenya ve Uganda'da yaşayan fakirlere karşılıksız olarak para dağıtan GiveDirectly yardım kuruluşunda görebiliriz. Geleneksel hayır işlerini çeşitli açılardan yeniden düşünerek dikkati üzerine çekmiştir. Sadece alışılmadık bir misyon olarak değil, aynı zamanda yapılan yardımlara getirdiği hesap

sorulabilirlik ve şeffaflıkla incelemeye değerdir. Ve mevcut durumuyla en son uğraştıkları şey başarı hikâyeleridir.

Program asistanı Rebecca Lange şöyle demektedir: “Eğer internet sitemizi, bloğumuzu ya da Facebook sayfamızı düzenli olarak ziyaret ederseniz, genelde görmediğiniz bir şey fark edebilirsiniz; yardımlarımızı alanların hikâye ve fotoğrafları.” Buradaki sorun diğer yardım kuruluşları tarafından sunulan fotoğrafların gerçek olmaması değildir. Başarıları göstermek için bilinçli olarak seçilmiş olmaları bunlardan ne kadar bilgi alınabileceği konusunu belirsiz kılmaktadır. Bu nedenle GiveDirectly bu geleceksel uygulamayı biraz değiştirmeye karar vermiş.

GiveDirectly ekibi her Çarşamba rastgele olarak yardım alan bir kişi seçmekte, onunla görüşmek üzere bağımsız bir saha görevlisi göndermekte ve bu görevlinin yazdığı raporu her ne olursa yayınlamaktadır. Örneğin aşağıda, aldığı yardımı evinin çatısını yaptırmak için kullanmış olan Mary isimli bir kadınla yaptıkları ilk görüşme raporunun bir kısmı yer almaktadır.*

Sacdan çatı iyi yapılmıştı. Aynı zamanda kendi evi için bir koltuk takımı alabilmişti. Hayatı değişmişti çünkü yağmur yağdığında evdeki her şeyi ıslatacak şekilde akıtan çatısı artık yoktu. Para yardımı sayesinde daha iyi bir ev yapabilmişti.

Lange “Bu uygulama sayesinde sizlerle paylaştığımız her türlü bilgi konusunda bize güven duymanızı ve hatta bunun diğer kuruluşlara daha yüksek standartlara uymaları konusunda ilham vermesini umuyoruz” demektedir.

* Siteden ilk yayımlanan hikâyeyi kasıtlı olarak alıntıladığımıza dikkat ediniz. Kitaba koymak için hepsini okuyup uygun olanı seçmedik çünkü bu yaklaşım amaca uygun düşmezdi.

Üç Kısımlı Ödünleşim

Özellikle edebiyatta başarılı bir insan yaratmak için gerekli olan kalite ya da Shakespeare'in sahip olduğu kalitenin büyüklüğü beni şok etmişti. Kastetmek istediğim Negatif Yetenektir: Bir kişinin belirsizlikler, gizemler, şüpheler içerisinde gerçeklere ve akla iğrenç bir şekilde ulaşmadan var olabildiği yetenek.

—John KEATS

Mutlak kesinlik diye bir şey yoktur, insanların hayatlarındaki amaçları için yeterli bir garanti vardır.

—John Stuart MILL

Bilgisayar bilimi genellikle ödünleşimler üzerine bir uzlaşıdır. Örneğin kitabın 3'üncü bölümünde sıralama konusundan bahsederken sıralama için harcanan zaman ile arama için geçen zaman arasındaki karşılıklı ödünleşim konusuna dikkat çekmiştik. Ve 4'üncü bölümde önbelleklerden bahsederken zaman kazanmak için ekstra yer konusundaki -önbellek için olan önbellek için önbellek- ödünleşimleri incelemiştik.

Zaman ve uzay, bilgisayar bilimindeki en bilinen ödünleşimlerin kökünde yer almaktadır. Lakin rastlantısal algoritmalar üzerine yapılan son çalışmalar dikkate alınması gereken bir başka değişken olduğunu göstermektedir: Kesinlik. Harvard'dan Michael Mitzenmacher'ın da belirttiği gibi, “Yapacağımız şey, zaman ve mekân tasarrufu sağlarken üçüncü boyut olan hata olasılığıyla ödünleşim içerisine girerek bir cevap bulmaktır.” Belirsizlik konusundaki favori ödünleşim örneğini vermesi istendiğinde hiç tereddüt etmemektedir: “Yakın zamanda bir meslektaşım bana, bir sunum esnasında bu terimin benim yansılarında her görüldüğünde içki içilmesi zorunlu olan bir oyun olması gerektiğini söyledi. Hiç Bloom süzgecini duydunuz mu?”

Bir Bloom süzgecinin ardındaki fikri anlamak için Mitzenmacher, Google arama motoru gibi bir arama motorunu gözünüzün önüne getirmenizi, internette sörf yapmanızı ve mümkün olan URL'leri listelemenizi söylemektedir. İnternet bir trilyondan fazla sayıda URL'den oluşmaktadır ve URL'ler ortalama 77 karakter uzunluğundadır. Arama motoru bir URL'ye baktığında o sayfanın daha önceden sahiplenilip sahiplenilmediğini nasıl kontrol edebilir? Daha önceden ziyaret edilmiş URL'leri bir listede saklamak çok fazla yer gerektirirdi ve o listede tekrar tekrar arama yapmak (tam olarak sıralanmış olsa bile) bir kâbusa dönüşebilirdi. Aslında çare, hastalıktan bile kötü olabilir. Diğer bir deyişle, bir sayfayı yeniden indekslemediğimizden emin olmak için her seferinde listeyi kontrol etmek sadece sıradan bir sayfayı iki kere indekslemekten daha fazla zaman alıcı olabilir.

Peki ya bu URL'nin bizim için yeni olduğundan sadece *nere-deyse* emin olmamız gerekseydi? Bloom süzgeci işte burada devreye girmektedir. Kendisini bulan Burton H. Bloom'dan ismini alan Bloom süzgeci, Rabin-Miller asallık testine oldukça benzer şekilde çalışmaktadır. URL aslında kendisinin yeniliğine “tanıklar” arayan bir dizi eşitliğe sokulur. (“*n* asal değildir” ifadesi yerine bu eşitlikler “*n*’i daha önce görmedim” demektedir.) Eğer sadece yüzde bir ya da yüzde ikilik bir hata oranını tolere etmek isterseniz, bulduklarınızı bir Bloom süzgeci gibi olasılıklı bir veri tabanında saklamak size önemli miktarda zaman ve yer tasarrufu sağlayacaktır. Ve bu tarz süzgeçlerin faydası arama motorlarıyla sınırlı değildir. Bloom süzgeçleri, URL'leri bir dizi bilinen kötücül internet siteleri listesinde kontrol etmek için yeni tarayıcılarla birlikte sunulmuştur ve ayrıca Bitcoin gibi kriptoparaların da önemli bir parçasını teşkil etmektedirler.

Mitzenmacher’a kulak verelim: “Hata-alan ödünleşimi fikri. Sanırım buradaki sorun insanların bunu hesaplamayla ilişkilendirmiyor olmalarıdır. Bilgisayarların bize cevabı vermesi gerek-

tiğini düşünüyorlar. Bu nedenle bunu algoritma dersinizde duyduğunuzda, ‘Size bir cevap vermesi gerekir; bu doğru cevap olmayabilir’ derim ve öğrenciler bunu duyduğunda dikkatlerini toplar. İnsanların kendi yaşamlarında bunu ne kadar yaptıklarının ve kabullendiklerinin farkında olmadıklarını düşünüyorum.”

Tepeler, Vadiler ve Tuzaklar

Nehir hep dolambaçlı yoldan akıyordu çünkü düşünemiyordu.

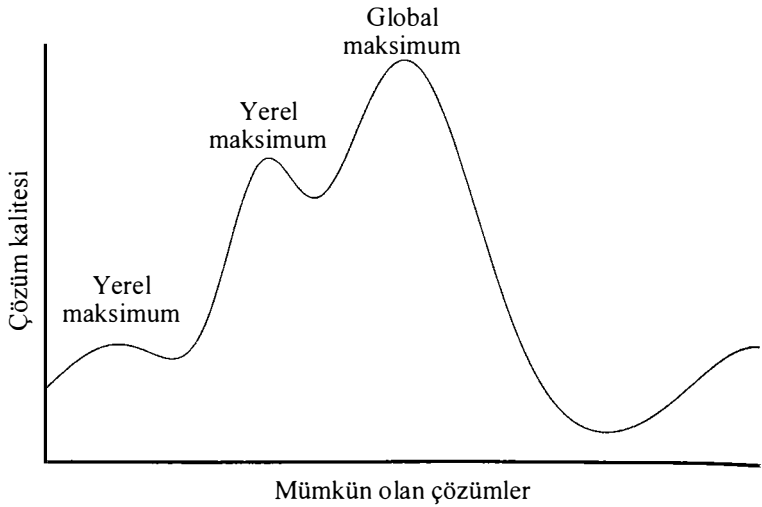
—Richard KENNEY

Rastlantısallık, NCAA basketbol ligi fikstürünü yaratmak ya da seyyar satıcı için en kısa güzergâhı bulmak gibi ayrık optimizasyon problemlerini çözmede güçlü bir silah olduğu konusunda kendisini kanıtlamıştır. Bir önceki bölümde gevşetmenin bu tarz problemlerin boyutlarını küçültmede nasıl büyük bir rol oynayabileceğini görmüştük fakat rastlantısallığın kullanımı muhtemelen daha önemli bir teknik olarak ortaya çıkmıştır.

Tüm dünyayı dolaşacak ve on şehre uğrayacak bir tatil planı yaptığınızı dolayısıyla kendi seyyar satıcı problem türünüzü oluşturduğunuzu düşünün. San Francisco’dan başlayacak ve yine burada bitireceksiniz ve Seattle, Los Angeles, New York, Buenos Aires, Londra, Amsterdam, Kopenhag, İstanbul, Delhi ve Kyoto’yu ziyaret edeceksiniz. Güzergâhın toplam uzunluğu konusunda endişe etmeyebilirsiniz lakin bu seyahatin maddi tutarını minimize etmek istersiniz. Burada dikkat edilmesi gereken ilk şey 10 tane şehrin kulağa çok gelmemesine karşın bu şehirlerden oluşturulabilecek seyahat planının 10 faktöriyel olmasıdır: 3,5 milyondan daha fazla. Diğer bir deyişle, her permütasyonu tek tek kontrol ederek en düşük fiyatlı olanı seçmeniz için pratik bir metot yoktur. Daha akıllıca hareket etmek zorundasınız.

İlk denemenizde San Francisco'dan çıkışlı en ucuz uçuşa batabilirsiniz (diyelim ki bu Seattle olsun) ve oradan diğer şehirlerle olan en ucuz uçuşu seçebilirsiniz (Los Angeles olsun), buradan en ucuz uçuşu (New York olsun) seçerek en sonunda onuncu şehre gidene kadar devam edin ve oradan da geri San Francisco'ya uçuşun. Bu, aynı zamanda “miyop algoritma” olarak düşünülebileceğiniz, açgözlü algoritma (greedy algorithm) olarak adlandırılan algoritmalarından birine örnektir. Sürecin her adımında sadece yakınındakileri görerek mevcutlar içinden en iyi seçeneği tercih eden bir algoritma. 5'inci bölümde görmüş olduğumuz gibi çizelgeleme teorisinde açgözlü bir algoritma -örneğin daha ilerisine bakmadan ya da planlamadan sadece eldeki işlerden en kısa sürecek olanı yapmak gibi- bazen bir problemi çözmek için ihtiyaç olan tek şey olabilir. Bu durumda, seyyar satıcı problemi için açgözlü algoritma ile bulunan çözüm muhtemelen çok kötü değildir fakat yapabileceğinizin en iyisinden biraz uzak olması da muhtemeldir.

Temel bir seyahat planını oluşturduğunuzda, şehirlerin sıralanmasında küçük karıştırmalar yaparak ve bunun bir iyileştirmeyele sonuçlanıp sonuçlanmadığına bakarak bazı alternatifleri test edebilirsiniz. Örneğin eğer ilk olarak Seattle, daha sonra da Los Angeles'a gidiyorsak bu şehirlerin yerlerini değiştirerek bir deneme yapabiliriz. Herhangi bir seyahat planı için 11 tane bunun gibi iki şehrin karşılıklı yer değiştirdiği düzenleme yapabiliriz; bunların hepsini deneyelim ve bize en fazla tasarruf ettiren planı seçelim. Bundan sonra artık elimizde üzerinde çalışabileceğimiz yeni bir seyahat planı vardır ve en iyi yerel iyileştirmeyi arayarak buradan hareketle değişiklikler yapabiliriz. Bu algoritma, **Tepe Tırmanma Algoritması (Hill Climbing Algorithm)** olarak bilinir çünkü bazıları iyi bazıları kötü olan çözüm uzayında yapılan arama, genellikle tepeler ve vadilerin olduğu bir manzara gibi düşünülür ve burada amacınız en yüksek zirveye ulaşmaktır.



Farklı olasılıklar içinde çözüm kalitesinin nasıl değişebileceğini gösteren “hataya neden olabilen bir manzara”

En sonunda diğer tüm permütasyonlardan daha iyi olan bir çözüm elinize geçecektir. Yan yana hangi iki şehri değiştirirseniz değiştirin hiçbir alternatif ondan iyi olmayacaktır. Tepe tırmanmanın durduğu nokta işte burasıdır. Peki bu, en iyi seyahat ilanını kesinlikle bulmuş olduğunuz anlamına gelmekte midir? Maalesef hayır. Tüm olasılıkların içinde yer alan global en iyiyi değil, “yerel” en iyiyi bulmuş olabilirsiniz. Tepe tırmanma işlemi sisli, puslu ve belirsizdir. Etrafınızdaki tüm arazi aşağıya doğru indiğinden bir dağın üstünde olduğunuzu bilebilirsiniz fakat hemen önünüzdeki vadinin diğer tarafında bulutların ardına gizlenmiş daha yüksek bir dağ daha olabilir.

Bir tuzağa düşmüş ve sıkışmış bir ıstakozu düşünün. Zavallı hayvan, tuzaktan çıkmak için *daha aşağı* gider ve ortadan çıkması gerektiğinin farkında değildir. Bir ıstakoz tuzağı, tellerden yapılmış bir yerel maksimumdan başka bir şey değildir: Öldüren bir yerel maksimum.

Tatil planlaması örneğinde yerel maksimumlar neyse ki daha az ölümcüldür fakat aynı karaktere sahiptir. Küçük değişikliklerle daha da iyileştirilemeyen bir çözüm bulduğumuzda bile global maksimumu kaçırıyor olmamız mümkündür. Gerçekten en iyi seyahat planı, radikal bir değişiklik gerektirebilir. Mesela tüm kıtaları tamamıyla farklı bir sıraya dizmek ya da doğuya doğru gitmek yerine batıya doğru gitmek gibi. Eğer iyileştirmeleri aramaya devam etmek istiyorsak çözümümüzü geçici olarak kötüleştirmemiz de gerekebilir. Ve burada rastlantısallık, bunu yapmak için bir strateji sunar. Aslında birçok strateji sunar.

Yerel Maksimumdan Çıkış

Yaklaşımlardan biri, Tepe Tırmanma Algoritmasını “seğirme (jitter)” olarak bilinen şeyle güçlendirmektir. Eğer takılıp kaldıysanız, işleri birazcık karıştırın. Kötüye bile gitse rastgele birkaç küçük değişiklik yapın, daha sonra yeniden Tepe Tırmanma Algoritmasına dönün ve daha yüksek bir zirveye ulaşıp ulaşamadığınıza bakın.

Diğer bir yaklaşım ise yerel bir maksimuma ulaştığımızda çözümümüzü *tamamen* karıştırmak ve rastgele ulaştığımız bu yeni başlangıç noktasından Tepe Tırmanmasına başlamaktır. Bu algoritma, “Rastgele Yeniden Başlamalı Tepe Tırmanma” ya da daha renkli adı ile “Shotgun Tepe Tırmanma” olarak bilinmektedir. Bir problemde çok fazla yerel maksimum olduğunda oldukça etkili olduğunu kanıtlamış bir stratejidir. Örneğin, bilgisayar mühendisleri bu stratejiyi şifreleri çözmeye çalışırken kullanırlar çünkü şifre çözmeye başlamanın, başlarda umut vadeder gibi gözüken ancak sonunda çıkmaz sokaklarda sonlanan çok fazla yolu vardır. Şifre çözmede, akla yakın İngilizce ifadeler benzeyen bir metin doğru yolda olduğunuzun bir işareti olmak zorunda değildir. Bu nedenle umut vadeden bir başlangıç istika-

metine çok fazla bağlanmamak ve en baştan sıfırdan başlamak en iyisidir.

Üçüncü bir yaklaşım daha vardır. Takılıp kaldığınızda tamamen rastlantısallığa dönmektense, *her bir* karar verme anınızda birazcık rastlantısallık kullanmak. Monte Carlo Metodunu geliştiren aynı Los Alamos ekibi tarafından geliştirilen bu tekniğin adı **Metropolis Algoritması**dır. Metropolis Algoritması bir çözümdeki küçük ölçekli değişiklikleri deneyerek ilerlediği için Tepe Tırmanma Algoritmasına benzer fakat arada önemli bir fark vardır: Herhangi bir noktada kötü yöndeki değişiklikleri de iyiler gibi kabul edebilecektir.

Bu tekniği tatil planlama problemimize uyguladığımızı düşünebiliriz. Farklı şehirlerin plandaki yerlerini değiştirerek çözümümüzü iyileştirmeyi deneriz. Eğer seyahat rotamızda rastgele oluşturulan bir değişiklik bir iyileştirme ise bunu her seferinde kabul eder ve buradan değişiklik yapmaya devam ederiz. Fakat değişiklik işleri birazcık kötüleştiriyorsa, yine de bunu tercih edip buradan devam etme ihtimalimiz vardır (değişiklik ne kadar kötü ise ihtimal o kadar azdır). Bu şekilde herhangi bir yerel maksimumda çok uzun bir süre takılıp kalmayız. Daha pahalı bile olsa yakındaki bir başka çözümü deneyecek ve muhtemelen yeni ve daha iyi bir plana en sonunda ulaşacağız.

İster seçirme ister rastgele yeniden başlama isterse de geçici bir kötüleştirme olsun, rastlantısallık yerel maksimumlardan kaçınmak için inanılmaz derecede faydalıdır. Şans faktörü, zorlu optimizasyon problemleriyle uğraşmanın sadece iyi bir yolu değil, birçok durumda zorunluluğudur. Ancak yine de beklemekte olan bazı sorular vardır. Ne kadar rastlantısallık kullanmalısınız? Ve ne zaman? Ve Metropolis Algoritması gibi stratejilerin seyahat planımızı oldukça uzun bir süre boyunca değiştirebileceği göz önüne alındığında sonucu bulduğunuzu ya da işinizin bittiğini nasıl bileceksiniz? Optimizasyon üzerinde çalışmakta olan

araştırmacılar için bu sorulara kesin bir cevap, tamamen başka bir alandan gelecekti.

Benzetilmiş Tavlama (Simulated Annealing)

1970'lerin sonları ve 1980'lerin başlarında Scott Kirkpatrick kendisini bir bilgisayar mühendisi olarak değil bir fizikçi olarak görüyordu. Kirkpatrick özellikle doğa olaylarını açıklamak için rastlantısallığı kullanan (mesela maddelerin ısıtıldıkça ve soğutuldukça hâllerinin değişimlerini inceleyen tavlama fiziği gibi) istatistiksel fizik ile ilgilenmekteydi. Tavlamanın belki de en ilginç yanı bir maddenin ne kadar yavaş ya da hızlı bir şekilde soğutulmasının onun son durumu üzerinde ne kadar büyük bir etkisinin olmasıydı. Kirkpatrick bunu şu şekilde açıklamaktaydı:

Bir eritme işleminden bir kristali büyütme, tavlama ile dikkatli bir şekilde yapılmaktadır. İlk önce maddeyi ısıtır, sonra ısıyı yavaşça düşürür ve donma noktası civarında uzunca bir süre geçirirsiniz. Eğer bu yapılmazsa ve maddenin dengeden çıkmasına izin verilirse, sonuçta ortaya çıkan kristalin pek çok bozukluğu olacaktır ya da madde herhangi bir kristal sıralaması olmayan bir cam oluşturur.

Kirkpatrick o zamanlar en büyük, en zorlu ve en kutsal problemlerden biri üzerinde, çiplerdeki devrelerin yerleşim planı üzerinde IBM'de çalışmaktaydı. Sorun hantal ve çözümsüz gibiydi. Dikkate alınması gereken çok fazla muhtemel çözüm ve zorlu kısıt vardı. Örneğin, genel olarak bileşenlerin birbirlerine yakın olmaları iyi bir şeydi ama çok yakın olmamalıydı çünkü bu sefer de tellere yer kalmazdı. Ve herhangi bir bileşenin yerini değiştirdiğiniz her seferde, bu yeni varsayılan yerleşimde tellerin nasıl uzanacağını yeniden hesaplamanız gerekmekteydi.

Bu süreç o zamanlar IBM'deki kripto gurusu olan bir kişi tarafından yürütülmekteydi. Kirkpatrick o zamanla ilgili hatırladıklarını şöyle dile getirmektedir: “IBM’de bir çipe daha fazla devre sıkıştırmadaki en iyi kişi, ne yaptığını en gizemli şekilde anlatma yöntemine sahipti. Size direkt olarak anlatmaktan hoşlanmazdı.”

Kirkpatrick’in arkadaşı ve IBM’den meslektaşı Dan Gelatt probleminden büyülenmişti ve çok geçmeden bu konuda bilgi sahibi olan Kirkpatrick’e kancayı taktı. “Fizik sistemlerini çalışmanın yolu onları ısıtmak, sonra soğutmak ve sonrada sistemin kendisini organize etmesine izin vermektir. Bu altyapıyla her türden optimizasyon problemine, sanki sizin organize etmeye çalıştığınız serbestlik derecesiymiş gibi davranmak, kusursuz doğal bir şey gibi görünüyordu.”

Fizikte “ısı” dediğimiz şey aslında hızdır: Moleküler ölçekte rastgele hareket. Kirkpatrick bunların bazen daha iyi çözümlerden daha kötü olanlara doğru gerilemek için bir tepe algoritmasına eklenebilen rastgele titreşimlere çok benzer olduğunu düşünmekteydi. Aslında Metropolis Algoritması ilk olarak fiziksel sistemlerdeki rastlantısal davranışları modellemek için tasarlanmıştı (nükleer patlamalar). Bu nedenle Kirkpatrick bir optimizasyon problemine bir tavlama problemi gibi muamele ederse-onu “ısıtıp” sonra da yavaşça “soğutursa”- ne olacağını merak etti.

Yukarıdaki on şehirli tatil problemimize devam edecek olursak, başlangıç seyahat planımızı tamamen rastgele seçerek (tüm çözüm uzayından fiyatına bakmaksızın birini seçerek) “yüksek sıcaklıktan” başlayabiliriz. Daha sonra şehir değişikliği düşündüğümüz her seferde bir zar atarak araştırmamızı yavaşça “soğutmaya” başlayabiliriz. Daha iyi bir varyasyonu kabul etmek her zaman mantıklıdır ama daha kötü olanları sadece zar bize bunu söylediğinde, örneğin iki ya da daha büyük geldiğinde

kabul ederiz. Bir süre sonra daha büyük bir sayı, örneğin üç ya da daha büyük bir sayı gelince araştırmamızı daha da soğuturuz, sonrasında dört ya da daha fazla gibi. En sonunda çoğunlukla tepe tırmanıyor, daha kötü bir sonucu ise nadiren (zar altı geldiğinde) kabul ediyor oluruz. Son olarak da sadece yukarı doğru ilerler ve bir sonraki yerel maksimuma ulaştığımızda dururuz.

Benzetilmiş Tavlama denilen bu yaklaşım fiziği problem çözmede uygulamanın ilginç bir yolu olmuştur. Peki, işe yarayacak mıydı? Daha muhafazakâr yöneylem araştırmacıları arasındaki tepki, bu yaklaşımın çok metaforik görünmesiydi. Kirkpatrick “Matematikçileri analogi tabanlı, ısıyla ilgili bu şeylerin hepsinin gerçek olduğuna ikna edememiştim çünkü matematikçiler gerçekten sezgiye güvenmemek üzere eğitilmişlerdi” demişti.

Ancak analogi tabanlı bu yaklaşıma dair güvensizlik çok geçmeden ortadan kaybolacaktı. Kirkpatrick ve Gelatt’ın tavlama benzetimi algoritmaları IBM’de gurulardan daha iyi çip yerleşim planları hazırlamaya başladı. Gizli silahları hakkında ağızlarını sıkı tutmaktansa ve gizemli gurular olmaktansa yöntemlerini herkese açarak *Science* dergisinde bir makalede yayınladılar. Sonraki yıllarda makalelerine 32.000 defa atıfta bulunulacaktı. Benzetilmiş Tavlama, optimizasyon problemlerine en fazla umut vadeden yaklaşımlardan biri olarak günümüze kadar gelmiştir.

Rastlantısallık, Evrim ve Yaratıcılık

Salvador Luria 1943’te kendisini Nobel ödülüne götürecek bir buluş yapmak üzere olduğunun farkında değildi. Bir dansa gittiğini sanıyordu. Yahudi ailesinin yaşadığı Mussolini İtalya’sından henüz ABD’ye göç etmiş Luria, bakterilerin virüslerden nasıl bağışıklık kazandıkları üzerine çalışmakta olan bir araştırmacıydı. Fakat Indiana Üniversitesi yakınlarındaki bir kulüpte fakülte toplantısına katıldığı o sırada araştırması aklında değildi.

Luria meslektaşlarından birinin kollu bir kumar makinesinde oynamasını izliyordu:

Bir kumarbaz olmayan ben, yenilmesinin kaçınılmaz olduğunu söyleyerek arkadaşımınla dalga geçerken o kazandı, 10 sentlerden oluşan üç dolarını eline aldı ve bana pis bir bakış atarak uzaklaştı. Ben de kumar makinelerinin sayısal düzenleri üzerine biraz kafa yordum ve bunu yaparken kumar makineleri ile bakteriyel mutasyonların birbirlerine öğretebileceği şeyler olduğunu fark ettim.

1940’larda bakterilerin virüslere (ve antibiyotiklere) dirençlerinin neden ya da nasıl geliştiği tam olarak bilinmiyordu. Bunlar virüse karşı bakterinin içinde gerçekleşen bir *reaksiyon* mıydı, yoksa kazara ara sıra direnç üreten süregelen mutasyonlar mıydı? Bunlardan hangisi olduğuna dair kesin sonuçlu bir cevap verecek deney yapmak için herhangi bir yol yok gibi görünmekteydi, ta ki Luria kumar makinesini görüp kafasında bir ışık yananana kadar. Luria bakterilerin farklı soylarını birkaç nesil boyunca beslerse ve sonra son nesli bir virüse maruz bırakırsa birbirinden çok farklı iki şeyden birinin olacağını fark etti. Eğer direnç virüse karşılık bir tepki ise soyları ne olursa olsun bakteri kültürlerinin her birinde kabaca aynı oranda dirençli bakterinin ortaya çıkması gerekirdi. Fakat diğer taraftan eğer direnç rastgele mutasyonlardan dolayı ortaya çıkmışsa eşit olmayan bir tablo-kumar makinelerinin kazandırma durumları gibi- ile karşılaşması gerekmektedir. Yani demek istediğimiz, birçok soydan gelen bakteride direnç olmayacak, bazılarının dirençli olacak şekilde mutasyona uğramış tek bir “torunu” olacak ve eğer doğru bir mutasyon türü nesiller boyunca gerçekleşmişse büyük ikramiye kazanılmış gibi olacaktı. Bir soydan gelen *bütün* “torunlar” di-

rençli olacaktı. Luria ilk fırsatta danstan ayrıldı ve deneyi başlattı.

Günler süren yorucu ve gergin bekleyişin ardından Luria kolonilerini kontrol etmek için laboratuvara döndü, *büyük ödülü* kazanmıştı.

Luria'nın buluşu şansın gücü hakkındaydı; rastgele, gelişigüzel mutasyonların nasıl viral direnç kazanabileceği hakkında. Aynı zamanda, kısmen de olsa, şansın gücü *sayesinde*. Doğru zamanda doğru yerdeydi ve kumar makinesini görmek yeni bir fikir doğmasına neden olmuştu. Buluşların hikâyeleri genellikle benzer anlardan bahseder. Newton'un (doğruluğu şüpheli) elması, Arşimed'in banyodaki "Evreka"sı, penisilinin bulunmasına neden olan unutulmuş petri kabı. Hatta bu durumu anlatması için bir kelimenin bile yaratıldığı yaygın bir şekilde kabul görmektedir: Horace Walpole 1754'te *The Three Princes of Serendip* (Sri Lanka'nın Üç Prensi) adlı eserde geçen ve "her zaman, arayışında olmadıkları şeyleri kazara keşfeden prenslerin hikâyesinden" doğan "serendipity" kelimesini bulmuştur.

Rastlantısallığın bu iki rolü -biyolojinin ve keşfin önemli bir bölümü olması- insan yaratıcılığını açıklamak isteyen psikologların gözüne sürekli olarak takılmıştır. Bu fikrin ilk örneklerinden biri William James tarafından gösterilmişti. 1880 senesinde Harvard'a henüz yeni atanmış bir doçent olan ve on sene sonra yazacağı *Psikolojinin İlkeleri* (*Principles of Psychology*) eserine henüz uzak olan James, *Atlantic Monthly* dergisinde "Great Men, Great Thoughts and the Environment" (Büyük Adamlar, Büyük Düşünceler ve Çevre) isimli bir makale yazdı. Makale onun şu teziyle başlamaktaydı:

Bir tarafta sosyal evrimin ve ırkların mental gelişim gerçekleri, diğer tarafta da Darwin tarafından açıklandığı şekli ile

zoolojik evrim gerçekleri arasında -benim bildiğim kadarıyla- daha önce fark edilmemiş büyük bir benzerlik bulunmaktadır.

James bu yazıyı kaleme aldığı sıralarda “zoolojik evrim” fikri hâlen taze sayılırdı. *Türlerin Kökeni (On the Origin of Species)* 1859 senesinde yayınlanmıştı ve Darwin hâlen hayattaydı. James, evrimsel fikirlerin insan toplumunun farklı özelliklerine nasıl uygulanabileceğinden bahsetti ve yazısının sonlarına doğru fikirlerin evrimine döndü:

Değişime uğrayan yeni fikirler, duygular ve aktif eğilimler ilk olarak rastgele görüntüler, hayaller, oldukça dengesiz olan insan beyninin anlık olarak değişen eylemlerinin rastlantısal sonucu olarak üretilirler ve dış çevre bunları onaylar ya da reddeder, kabul eder ya da geri çevirir, saklar ya da yok eder. Kısaca, analog bir türün moleküler kazası nedeniyle morfolojik ve sosyal değişiklikleri seçtiği gibi.

James böylece rastlantısallığı yaratıcılığın tam kalbinde görmektedir. Ve pek çok yaratıcı insanda abartıldığını düşünüyor. Bununla ilgili şu sözleri kaleme almıştı: “Bir anda fikirlerle dolu kaynayan bir kazanla karşılaşıyoruz ve burada her şey şaşırıcı bir hareketlilik içinde fokurdamakta, ortaklıklar bir anda oluşmakta ya da bozulmakta, döngü rutini bilinmemekte ve beklenmedik olan tek kanun gibi görünmektedir.” (Burada da aynı “tavlama” fikrine dikkat edin; ısı metaforu içinde gizlidir ve burada permütasyon ısıya eşittir.)

James’in teorisinin modern örnekleri 100 yıl sonra yaşayacak olan psikolog Donald Campbell’in çalışmasında görünmektedir. Campbell 1960’da “Blind Variation and Selective Retention in Creative Thought as in Other Knowledge Processes” isimli bir makale yazdı. O da James gibi yazısına ana tezi ile başladı. “Kör

varyasyon ve seçici muhafaza süreci tümevarım başarılarının, bilgidaki gerçek artışlar ve sistemlerin çevreye olan uyumlarındaki artışların tümü için temeldir.” Ve o da James gibi evrim düşüncesinden, yaratıcı yeniliği rastgele yaratılan yeni fikirlerin ve insan beyninin bu fikirlerden sadece en iyilerini saklamasının sonucu olarak görmekten heyecanlanmaktaydı. Campbell görüşünü, diğer bilim insanları ve matematikçilerin kendi buluşlarının ardında yatan süreçler hakkında söylediklerini alıntılayarak destekledi. 19’uncu yüzyıl fizikçi ve filozofları Ernst Mach ve Henri Poincare de Campbell’inkine benzer bir hikâyeye sundular. Mach “Newton, Mozart, Richard Wagner ve diğerlerinin düşünceler, melodiler ve armonilerin kendilerine âdeta aktığını ve onların sadece doğru olanları sakladıklarını söylemeleri incelenmeli” diyecek kadar ileri gitmişti.

İş yaratıcılığı tetiklemek olduğunda, yaygın olarak kullanılan bir teknik; insanların ilişki kurması beklenen bir kelime gibi rastlantısal bir unsuru sürece tanıtmaktır. Örneğin müzisyen Brian Eno ile ressam Peter Schmidt yaratıcılık problemlerini çözmek için Meyilli Stratejiler olarak bilinen bir deste oyun kartı yaratmışlardır. Herhangi bir kartı seçin ve projenize rastgele, yepyeni bir bakış açısıyla bakın. (Ve eğer bu size çok fazla iş çıkarırsa, sizin için kart seçecek bir uygulamayı şimdi telefonunuza indirebilirsiniz.) Eno’nun neden bu kartları geliştirdikleri konusundaki görüşünün yerel maksimumlardan kaçınma hareketine oldukça benzeyen yanları bulunmaktadır:

Bir şeyin tam ortasında iken en açık seçik ortada olan şeyleri unutursunuz. Stüdyodan çıkar ve “Bunu ya da şunu yapmayı neden hatırlamadık?” dersiniz. Bu kartlar sizi belirli kalıpların dışına çıkarmak ve içinde bulunduğumuz bağlamdan ayırmak için bir yoldur. Bu şekilde bir şarkıya odaklanmış stüd-

yodaki bir grup olmazsınız, yaşayan ve dünyadaki diğer pek çok şeyinde farkında olan insanlar olursunuz.

Rastgele silkelenen, kalıpların dışına atılan ve daha geniş bir ölçeğe odaklanan kişiler olmak yerel olarak iyi gözüken şeyden ayrılmak ve küresel anlamda optimal olan şeyin peşine düşmek için size bir yol sunar.

Ve hayatınıza birazcık rastgele teşvik sunmak ve sizi harekete geçirecek bir şeyler katmak için Brian Eno olmak zorunda değilsiniz. Örneğin Wikipedia size “Özel Rastgele” sayfası sunmaktadır ve Tom bu sayfayı yıllardır tarayıcısının ana sayfası olarak kullanmaktadır. Bu sayede yeni bir pencere açtığında rastgele seçilmiş olan bir Wikipedia bilgisi görmektedir. Böyle yapması henüz çarpıcı bir buluşla sonuçlanmamış olsa da çok bilinmeyen bazı konularda pek çok şey öğrenmiştir (Örneğin Çin Silahlı Kuvvetleri tarafından kullanılan bir bıçak gibi) ve bunlardan bazılarının hayatını zenginleştirdiğini düşünmektedir. (Örneğin, Portekizcede “var olmayan ve muhtemelen de var olmayacak bir şey için anlaşılmaz ve sürekli bir arzu” anlamına gelen bir kelime olduğunu öğrenmiştir.) Bunun ilginç bir yan etkisi de artık sadece Wikipedia’da hangi tür konuların yer aldığını bilmekle kalmaması, aynı zamanda rastlantısallığın gerçekte nasıl görüldüğü hakkında daha iyi bir anlayışa sahip olmasıdır. Örneğin kendisinin bildiği kişi ya da yerler hakkındaki maddeler gibi kendisi ile bir bağlantısı varmış gibi olan sayfalar şaşırtıcı bir sıklıkla karşısına çıkmaktadır. (Bir keresinde “Avustralya Yasama Konseyi, 1962-1965 üyeleri” başlığı iki kere karşısına çıktı ve kendisi Batı Avustralya’da büyümüştü.) Bunların gerçekten rastgele yaratıldığını bilmek hayatının diğer bölümündeki “tesadüfleri” değerlendirmek için daha uygun olmasını mümkün kılmaktadır.

Gerçek dünyada sebzelerinizi, haftada bir kez size bir kutu ürün getirecek yerel bir tarım grubuna üye olarak rastlantısallaştırabilirsiniz. Daha önce görmüş olduğumuz gibi, bir CSA üyeliği bir çizelgeleme problemine neden olmaz ama normalde almayacağınız sebze ve meyvelerin size gönderilmesi yemek tarifi döngünüzdeki yerel maksimumdan kurtulmak için harika bir yoldur. Benzer şekilde ayın kitabı, şarabı ya da çikolatası gibi kulüpler entelektüel, şarap uzmanı ve gurme olmak için başka şekilde sahip olamayacağınız harika fırsatlar sunar.

Her kararı yazı tura atarak almanın bir sorun yaratabileceği konusunda endişelenebilirsiniz, en azından patronunuz, aileniz ya da arkadaşlarınızla. Ve rastlantısallığı hayatınızın merkezine yerleştirmek başarı için bir reçete olmayabilir. 1971’de Luke Rhinehart tarafından (Gerçek adı George Cockcroft) yazılan kült roman *Zar Adam (The Dice Man)* bu konuda uyarıcı bir hikâye anlatmaktadır. Bu kitapta anlatılan kişi hayatındaki karar verme işlemini zar atmayla değiştirmiş ve çok geçmeden kendisini, pek çoğumuzun kaçınmak isteyeceğimiz bir konumda bulmuştur.

Ancak belki de sadece çok az şey bilmenin tehlikeli olduğu bir durumdur. Eğer Zar Adam bilgisayar bilimi hakkında daha fazla şey biliyor olsaydı, yolunu daha iyi bulabilirdi. İlk olarak, Tepe Tırmanma Algoritmasından şunu öğrenebilirdi; bazen kötü fikirlerle hareket etme alışkanlığına sahip olsanız da *her zaman* iyi fikirlerle hareket etmeniz gerekir. İkinci olarak Metropolis Algoritmasından; kötü bir fikri izleme ihtimaliniz bu fikrin ne kadar kötü olduğuyla ters orantılı olmalıdır. Üçüncü olarak Benzetilmiş Tavlama’da; rastlantısallığı baştan devreye sokmalı, tamamen rastgeleye doğru soğumalı, zaman geçtikçe gittikçe azalan şekilde rastlantısallık kullanmalısınız. Kendinize gerçekten de tav verin.

Bu son nokta, yazarın kendisinde de yok değildir. Cockcroft karakteri gibi yaşamının bir bölümünde “zar atma” yaklaşımını

uygulamış ve ailesiyle birlikte Akdeniz’de bir teknede göçebe olarak yaşamıştır. Bir noktadan sonra kendi tavlama süreci devreye girmiştir. New York eyaletinde bir göl kenarında, yerel bir maksimumda durulmuştur. Şimdi 80’li yaşlarda olan Cockcroft *The Guardian*’a şöyle demiştir: “Mutlu olduğunuz bir yere geldiğinizde, daha fazla hareket etmeniz için aptal olmanız gerekir.”

İletişim Ağı Yönetimi (Networking)

Nasıl Bağlanırsınız?

Bağlantı teriminin çok geniş bir yelpazede anlamları bulunmaktadır. İki şey arasındaki fiziksel ya da mantıksal yol, bu yol üzerindeki akış, bir yolun tesis edilmesiyle ilgili eylemler veya iki ya da daha fazla şey arasındaki ilişkiye (ister bir yol olsun ister olmasın) ait olabilir.

—Vint CERF ve Bob KHAN

Sadece bağlanın.

—E.M. FORSTER

Uzun mesafe telgraf iletişimi, gelecekte neler olacağına işaret eden bir kehanetle başlamıştı. ABD Yüksek Mahkeme salonunda 24 Mayıs 1844'te ayakta duran Samuel F. B. Morse, Baltimore'daki asistanına Eski Ahit'ten bir söz gönderdi. "Tanrım, neler yaptın?" Yeni bir bağlantı hakkında ilk sorduğumuz şey nasıl başladığıdır ve buradan onun geleceği hakkında çıkarım yapmaktan kendimizi alamayız.

Alexander Graham Bell tarafından 10 Mart 1876'da asistanıyla yapılan tarihteki ilk telefon görüşmesi bir parça paradoksla başlamıştı. "Mr. Watson buraya gelin, sizi görmek istiyoy-

rum” ifadesi bu buluşun fiziksel mesafelerin üstesinden gelme konusundaki hem yeteneğini hem de yetersizliğini göstermekteydi.

Cep telefonu görüşmeleri bir böbürlenmeyle başladı. 3 Nisan 1973’te 6’ncı Cadde’de yürümekte olan Motorola’dan Martin Cooper, Manhattan’daki yayaların şaşkın bakışları arasında AT&T’den rakibi Joel Engel’i aradı ve şöyle dedi: “Joel, seni bir cep telefonundan arıyorum. Gerçek bir cep telefonu. Hem de elde taşınan, portatif, gerçek bir cep telefonu.” (Cooper’ın “Ne dediğini tam olarak hatırlamıyorum ama gerçekten bir süre bir sessizlik oldu. Sanırım dişlerini gıcırdatıyordu.”)

Kısa mesajlar da 3 Aralık 1992’de neşeyle başladı. Sema Group Telecoms’tan Neil Papworth Vodafone’dan Richard Jarvis’e erken bir “Mutlu yıllar” dileği iletiyordu.

İnternetin başlangıcı ise bunlardan daha mütevazı ve daha talihsiz olmuştu. Tarih 29 Ekim 1969’du ve UCLA’dan Charlie Kline, Stanford Araştırma Enstitüsü’nden Bill Duvall’a bir bilgisayardan diğerine ARPANET üzerinden gönderilen ilk mesajı gönderdi. Mesaj “login” idi ya da en azından eğer alan makine “lo” karakterini aldıktan sonra çökmeseydi bu kelime olacaktı.

İnsan bağlantılarının temeli protokoldür: El sıkışmalardan merhabalara, etiketlere, kibarlıklara ve sosyal normların tümüne kadar olan prosedür ve beklentilerin paylaşılan bir anlaşması. Makinelerin bağlanması da hiç farklı değildir. Protokol aynı sayfaya nasıl gittiğimizdir, aslında kelimenin Yunancadaki kökü bir kitabın ya da yazının dış kapağına verilen isim olan “ilk yapıştırıcı (first glue)” anlamına gelen *Protokollon*’dur.

Kişiler arası ilişkilerde bu protokoller ince fakat uzun süreli bir endişe kaynağı olurlar. Birkaç gün önce falanca kişiye bir mesaj gönderdim, almamış olabileceğinden ne zaman endişe etmeye başlamalıyım? Saat şu an yarımı geçiyor ve öğlen konuşmak için sözleşmiştik; ikimiz de diğerinin aramasını mı bekliyo-

ruz acaba? Cevabın kulağa biraz garip geldi, ben mi yanlış anladım yoksa sen mi yanlış anlattın? Tekrar eder misin?

Telgraftan kısa mesaja kadar iletişim teknolojimizin çoğu bize sadece birbirine benzeyen bu kişisel sıkıntıları yaşamak için yeni yollar sunmuşlardır. Fakat internetle birlikte bilgisayarlar sadece araç değil, aynı zamanda iletişimde son nokta da oldular. Konuşmayı yapanlar artık bilgisayarlardır. Bu nedenle kendi iletişim sorunlarını çözmeleri için sorumlu tutulmaları gerekli. Bu makineden makineye problemler ve çözümleri bir zamanlar bizim sorunlarımızı yansıttı.

Paket Değişimi

“İnternet” olarak şimdilerde düşündüğümüz şey aslında birçok protokolün bir araya gelmesidir. Bunlardan en önemlisi (çoğunlukla internetle eş anlamlı olarak da anılmaktadır) İletim Kontrol Protokolü (Transmission Control Protocol, TCP) olarak bilinendir. Vinton “Vint” Cerf ile Robert “Bob” Kahn’ın bir “ağlararası (internetwork)” (böyle adlandırmayı hayal etmişlerdi) dil önerilerinin detaylarını sunan 1973’teki konuşmaları ve bu konuşmadan doğan 1974’teki yazılarından doğmuştur.

TCP ilk olarak telefon hatlarını kullandı fakat asıl evrimsel olarak görülen telefondan ziyade *postanın* gelişimiydi. Telefon görüşmeleri “devre anahtarlama (circuit switching)” denilen şeyi kullanmaktadır. Sistem, gönderici ve alıcı arasında görüşme sürdüğü müddetçe devam eden ve her iki yönde de sabit bant genişliği sağlayan bir kanal açar. Devre anahtarlama insanların etkileşimi için oldukça mantıklıdır lakin daha 1960’larda bile bu paradigmanın makinelerin iletişimi için işe yaramayacağı açık bir şekilde belli olmuştu.

UCLA’dan Leonard Kleinrock o zamanlarla ilgili hatırladıklarını şöyle ifade etmektedir:

Bilgisayarların insanların konuştuğu şekilde konuşmayacaklarını biliyorum. Bir anda patlıyorlar ve sonrasında derin bir sessizliğe gömülüyorlar. Siz neredeyse hiç konuşmayan ve konuşmak istediğinde hemen erişim isteyen bir şeye iletişim hattı tahsis etmek ister misiniz? Bu nedenle sürekli görüşme için tasarlanmış olan telefon şebekesini -devre anahtarlama şebekesini- kullanmamamız ve başkasını kullanmamız gerekiyor.

Telefon şirketleri protokollerinde temel bir değişiklik hakkında konuşmayı akla yatkın bulmuyorlardı. Devre anahtarlama uzaklaşmak delice olarak nitelendiriliyordu. Hatta şebeke konusunda bir araştırmacı olan Van Jacobson'un kelimeleriyle "tamamen sapkınlık" olarak düşünülüyordu. Kleinrock, telekomünikasyon şirketleriyle görüşmesini şu şekilde hatırlamaktadır:

Zamanın en büyük şebekesine sahip AT&T'ye gittim ve onlara, bize iyi bir veri iletişim sistemi vermeleri gerektiğini anlattım. Onların cevabı ise 'Sen neden bahsediyorsun? ABD bir bakır madeni gibi, her tarafı telefon hatlarıyla dolu, onları kullanın' oldu. Ben ise hayır, anlamıyorsunuz dedim. Bir görüşme kurmak 35 saniye almakta, bana en az üç dolarlık ücret tarifiesi uyguluyorsunuz ve benimse tek istediğim 100 mili saniyelik veri göndermek. Cevapları, 'Git buradan ufaklık!' oldu. Böylece ufaklık gitti, diğerleriyle birlikte onların üstesinden gelecek bu teknolojiyi geliştirdi.

Devre anahtarlamanın üstesinden gelen teknoloji paket değişimi olarak bilinecekti. Bir paket değişim ağında her bağlantı için ayrılmış özel bir kanal kullanmak yerine göndericiler ve alıcılar, mesajlarını "paket" olarak bilinen küçük parçalara ayırır

ve bunları toplu bir veri akışında birleştirir: Bir nevi ışık hızında seyahat eden kartpostallar gibi.

Apple ağ uzmanı Stuart Cheshire, “Böylesi bir ağda bağlantı diyebileceğiniz şey, iki uç nokta arasındaki illüzyondur. İnternette herhangi bir bağlantı yoktur. İnternette bir bağlantı hakkında konuşmak, ABD posta sistemindeki bir bağlantı hakkında konuşmak gibidir. İnsanlara mektup yazarsınız ve her mektup bağımsız olarak gider ve geriye bir cevap mektubu gelir ve siz de bu cevaba cevap yazacak şekilde bir süreliğine devamlılık sağlarsınız ama ABD Posta sistemi bunu bilmez... Onlar sadece mektupları teslim ederler” demektedir.

Bant genişliğinin verimli kullanımı 1960’larda paket değişimi için olan araştırmaları yönlendiren tek düşünce değildi. Nükleer savaş da araştırmalarda büyük bir etkendi. RAND kuruluşundan Paul Baran ağ sağlamlığı sorununu çözmeye çalışıyordu. Böylece askeri iletişim, şebekenin büyük kısmını çökerten bir nükleer saldırıdan sonra da devam edebilecekti. 1950’lerde labirentlerde yol bulmak için geliştirilen algoritmalarından esinlenen Baran, her bilgi parçasının dinamik olarak değişen bir ağda varış noktasına doğru kendi yolunu bulduğu bir tasarım hayal etti.

Bu, devre anahtarlama ve onun sabit bağlantıları için ikinci bir ihtardı. Bu sabitlik, kesilen bir görüşmenin o şekilde kalması anlamına gelmekteydi. Devre değişimi, sağlamlığın göstergeleri olan esneklik ve uyum sağlama özellikleri açısından yeterli değildi. Paket değişimi zamanın istediği şeyi verebilirdi. Devre anahtarlama şebekelerde bir görüşme esnasında taraflardan herhangi biri hattan düşerse iletişim sona erer ve bu da şebeke sayısı arttıkça güvenilirliğin üstel hızda azalması anlamına gelir. Diğer taraftan paket değişiminde ise büyüyen bir ağdaki yolların sayısının hızla artışı bir değer hâline gelmektedir. Artık veri akışı için çok daha fazla yol bulunmaktadır, bu nedenle de ağın güvenilirliği, boyutuyla birlikte üstel olarak *artmaktadır*.

Van Jacobson'ın da belirttiği gibi paket değişimi yöntemi geliştirildikten sonra bile telekomünikasyon şirketleri bu gelişmeden etkilenmemişlerdi. “Telefon şirketlerindeki herkes oldukça yüksek sesle bunun bir şebeke olmadığını söylediler! Bu, *onların* şebekesini kullanmanın kötü bir yoluydu! *Onların* hatlarını alıyor ve *onların* yarattığı yolları kullanıyorduk! Ve aynı zamanda onların şebekesinin üzerine çok fazla yük bindiriyor ve verimli bir şekilde kullanılmasına engel oluyorduk.” Fakat duruma paket değişimi yöntemi tarafından bakacak olursak telefon hatları amaca hizmet eden bir araçtı: Alınan ve gönderilen paketlerin nasıl iletildiğine pek de aldırılmazlar. Çok sayıdaki farklı ortamlarda belirsizlik şartlarında işletilebilme yeteneği, paket değişiminin en büyük özelliği olacaktı. 60'ların sonları ve 70'lerin başlarındaki ARPANET gibi ilk ağdan ve konseptin geçerliliğini kanıtlamasından sonra sadece bakır telefon hatları üzerinden değil, aynı zamanda uydu ve telsiz üzerinden de paket değişimi yapan her türden ağ ülke çapında ortaya çıkmaya başladı. Hatta 2001'de Norveç'in Bergen şehrinden bir grup bilgisayar mühendisi “Avian Carriers” ile güvercinlerin ayaklarına bağlanan bir paket değişim şebekesi bile işlettiler.

Paket değişimi elbette ki sorunsuz olmayacaktı. Herhangi bir protokol için ilk soru oldukça basittir: Mesajlarınızın iletildiğini nasıl anlarsınız?

Alındı Bilgisi

Hiçbir aktarım yüzde 100 güvenli değildir.

—Vint CERF ve Bob KAHN

“Tanrım neler yaptın” ifadesi sadece, ABD’de gönderilen ilk uzun mesafeli telgraf mesajı değildi. Aynı zamanda ikincisiydi de: Alfred Vail alındı bilgisi olarak ABD Yüksek Mahkemesi binasındaki Morse’a aynı ifadeyi gönderdi.

Bu gönderi sayesinde Morse ve etrafında toplanan mahkeme üyeleri, mesajın alındığından emin olmuşlardı; elbette ki Vail'in bu mesaj tercihini önceden bilmediği varsayımıyla. Peki Vail, mesajının iletildiğinden nasıl emin olacaktı?

Bilgisayar mühendisleri bu konsepti, “Bizans generalleri problemi (Byzantine generals problem)” olarak bilmektedir. İçinde düşmanların bulunduğu vadinin iki yanına birliklerini konuşlandırmış ve bir taarruzu koordine etmeye çalışan iki general düşünün. Sadece kusursuz bir senkronizasyonla başarıya ulaşabilecekler ve her iki birlikten birinin tek başına kalkışacağı bir taarruz intihar olacaktır. Daha da kötüsü, her iki general arasındaki mesajlar düşmanın bulunduğu alandan geçecek olan haberciler tarafından bizzat iletilmek zorundadır ve bu da herhangi bir mesajın asla yerine ulaşmama ihtimali olduğu anlamına gelmektedir.

Diyeğim ki bir general taarruz için zaman önerisinde bulunuyor fakat diğer generalin harekete geçtiğinden emin olmadan da harekete geçmek istemiyor. Diğer general emirleri alıyor ve bunun anlaşıldığına dair bir mesaj gönderiyor ama mesajının diğerine ulaştığından emin olmadan harekete geçmek istemiyor (çünkü öbür general harekete geçmeyecektir). İlk general mesajının ikinci general tarafından alındığını öğreniyor fakat ikinci generalin bunu bildiğinden emin olmadıkça taarruza geçemiyor. Böylesi bir mantık zincirini izlemek sonsuz bir mesaj silsilesi gerektirir ve açık bir şekilde de işe yaramayacaktır. İletişim, teoride imkânsız olan lakin uygulamada işleyen muhteşem şeylerden biridir.

Birçok senaryoda iletişim hatalarının sonuçları nadiren bu kadar kötüdür ve emin olma ihtiyacı da nadiren bu kadar mutlaktır. TCP’de bir hata genellikle kayıptan ziyade yeniden bir iletişim mesajına neden olur, bu nedenle de bir seansa “üçlü el sıkışma” denilen bir şeyle başlamak yeterli olarak değerlendirilir.

Ziyaretçi merhaba der, sunucu bunu alır ve o da karşılık olarak merhaba der ve ziyaretçi de bunu kabul eder. Eğer sunucu bu üçüncü mesajı alırsa ilave bir onaylama ya da doğrulamaya gerek yoktur ve artık işlerine bakabilirler. Fakat ilk bağlantının tesis edilmesinden sonra bile ileride bazı paketlerin iletim esnasında zarar görme, kaybolma ya da yanlış sırada ulaşma riski mevcuttur. Postacılıkta paket teslimi geri gelen faturalarla teyit edilebilir. Çevrim içi olarak ise paket teslimleri, bildirim ya da ACK olarak bilinen şeyler aracılığı ile teyit edilirler. Bunlar, ağır işleyişi açısından hayati öneme haizdir.

ACK'lerin işleyiş yöntemi hem basit hem de zekicedir. Üçlü el sıkışmasının ardında, her makine diğerine bir seri numarası gönderir ve ondan sonra gönderilecek her pakette, tıpkı bir çek defterindeki sayfalarda olduğu gibi her seferinde bir artırarak gönderir. Diyelim ki bilgisayarınız bir web sunucusuyla temas başlatmış ve sunucuya 100 rakamını göndermiş olsun. Sunucu tarafından gönderilen ACK da buna karşılık kendi paketlerinin başlayacağı bir numara gönderir (örneğin 5000) ve aynı zamanda "101 için hazırım" mesajını gönderir. Sizin makinenizin ACK'sı 101 rakamını taşıyacaktır ve sunucuya karşılık olarak "5001 için hazırım" mesajını iletir. (Bu iki numaralama planının tamamen birbirinden bağımsız olduğuna ve bu sayı dizilerinin başlangıçlarının rastgele seçildiğine dikkat ediniz.)

Bu mekanizma, paketlerin ne zaman yoldan çıktığını ya da yanlış yola saptığını tam olarak belirlemek için bir yol sağlar. Eğer sunucu 101 numarayı beklemesine karşın bunun yerine 102 numaralı paketi alırsa bu 102 numaralı pakete cevap olarak "101 için hazır" diyen bir ACK gönderir. Eğer bir sonraki adımda 103 numaralı paketi alırsa yine "101 için hazır" mesajını gönderecektir. Bu şekilde olan art arda üç mesaj sizin makinenize 101 numaralı paketin sadece gecikmediğini, aynı zamanda kayıp olduğu sinyali verir ve makineniz bunun üzerine 101'i yeniden

gönderecektir. Bu aşamada, 102 ve 103 numaralı paketleri muhafaza etmiş olan sunucu “104 için hazır” diyen ve sıranın muhafaza edildiğini bildiren bir ACK gönderir.

Tüm bu alındılar aslında oldukça fazla miktarda bir trafiğe neden olabilir. Örneğin, büyük bir dosya transferini tek yönlü bir işlem olarak düşünebiliriz ama aslında alıcı, yüzlerce “kontrol mesajı” göndermektedir. 2014’ün ikinci yarısına ait bir rapor internetin en yoğun olduğu saatlerdeki trafiğin neredeyse yüzde 10’una genelde hepimizin tek yönlü olarak indirme işlemi gerçekleştirdiğini düşünme eğiliminde olduğumuz Netflix’in neden olduğunu göstermiştir. Lakin videolar, çok fazla miktarda ACK’ya neden olmaktadır.

İnsanlar açısından bir mesajın gerçekten ulaşip ulaşmadığı konusundaki endişe, sohbetleri dolduracak şekilde ilave konuşmalara neden olur. Konuşan bir kişi her cümlesinin sonuna bilinçsiz bir şekilde “anladınız mı?” ifadesini ekleyebilir ve bir dinleyici de kendi açısından başıyla onaylama, “hı hı”, “evet” gibi ifadeler kullanmaktan kendisini alamaz. Bunu yüz yüze bile yaparız ama bir telefon görüşmesinde iletişimin devam ettiğinden emin olmanın tek yolu da budur. Bir cep telefonu şebekesi için olan 21’inci yüzyılın en başarılı pazarlama kampanyasının içinde bir ağ mühendisinin defalarca “Beni şimdi duyabiliyor musun?” ifadesini kullanmış olmasına şaşmamak gerekir.

Karşılıklı iletişimde bir şeyler ters gittiğinde genelde aklımızda bir soru işareti kalmaktadır. Yazılımlar konusunda bir bloğu olan Tyler Treat şöyle demektedir:

Dağıtık bir sistemde bir mesajın alındığına dair bilgi alarak teyit etmeye çalışırız fakat her şey ters gidebilir. Mesaj mı ulaşmadı? Alındı bilgisi mi gelmedi? Alıcıda mı sorun var? Yoksa sadece sistem mi yavaş? Ağ mı yavaş? Ben mi yavaşım?

Bizanslı generaller, karşılaşmış olduğu sorunların “tasarım karmaşıklığı değil, imkânsızlık sorunları” olduğunu bize hatırlatmaktadır.

Vint Cerf önceki ağ araştırmalarının “güvenilir bir ağ inşa edebileceğiniz varsayımına” dayandığını belirtmektedir. Diğer taraftan “internet ise hiçbir ağın güvenilir olmak zorunda olmadığı ve gerektiğinde durumu düzeltmek için uçtan uca yeniden iletimler yapmak zorunda olunacağı varsayımına dayanmaktadır.”

İronik bir şekilde bu durumun birkaç istisnasından biri, insan sesinin iletiminde karşımıza çıkmaktadır. Skype gibi gerçek zamanlı sesli iletişim sağlayan bağlantılar genellikle internetin büyük kısmının altında yatmakta olan TCP’yi kullanmazlar. Araştırmacıların ağ çalışmalarının başlarında keşfetmiş olduğu gibi, tüm ACK’leri ve kaybolan paketlerin yeniden iletimleriyle birlikte insan sesini iletmek için güvenilir ve sağlam protokoller kullanmak aşırı derecede sisteme yük yüklemek demektir. Sağlamlığı, insanların kendileri sağlamaktadır. Cerf bunu şu şekilde açıklamaktadır: “Ses iletimi konusunda, eğer bir paketi kaybederseniz sadece ‘Bir şeyi kaçırdım galiba, yeniden söyleyebilir misin?’ deyin yeter.”

Bu nedenle, arka plandaki gürültüleri otomatik bir şekilde azaltan telefon servis sağlayıcıları kullanıcıları için aslında büyük bir kötülük yapmaktadırlar. Arka plandaki statik sesler bağlantının hâlen sürdüğünün anlaşılmasının garantisidir. Bu ses olmadan, bir kişi sürekli olarak bağlantının kesilmiş olabileceği ihtimaliyle karşı karşıya kalmakta ve sürekli olarak durumun bu olmadığını teyit etmek zorunda kalmaktadır. Bu aynı zamanda tüm paket değişimi protokollerinin endişe yaşadığı bir konudur; ister metin mesajı olsun isterse posta ya da çevrim içi çöpçatanlık hizmetleri. Her mesaj son mesaj olabilir ve genellikle iyi cevap vermek için biraz düşünerek zamanını değerlendiren bir ki-

şiyile görüşmeyi sonlandırmış olan bir kişiyi ayırt etmek neredeyse imkânsızdır.

Peki o zaman *güvenilir olmayan* bir kişi ya da bilgisayarla ne yapacağız?

Burada sorulacak ilk soru ne kadarlık bir sessizlik süresinin kopmaya delalet ettiğidir. Bu durum kısmen ağın özelliğine bağlıdır. Telefondayken birkaç saniye sonra bundan endişelenmeye başlarız, e-posta durumunda günler, postayla gönderdiğimiz mektuplarda ise haftalar sonra endişelenmeye başlarız. Alıcı ve gönderici arasındaki karşılıklı gidip gelme süresi ne kadar uzunsa bir sessizliğe anlam yüklenmesi de o kadar uzun sürer ve gönderen kişi bir sorun olduğunu anlayana kadar çok daha fazla bilgi havada kaybolup gitmiş olabilir. Şebekelerde alındı bilgisinin zamanlaması için olan beklentiler sistemin doğru bir şekilde işlemesi için çok önemlidir.

İkinci soru da elbette ki bir kopma olduğunu anladığımızda bunun hakkında tam olarak ne yapmamız gerektiğidir.

Üstel Geri Çekilme (Exponential Backoff):

Affetmenin Algoritmaları

Dünyanın çevrilmesi en zor kelimesinin, Kongo'da konuşulan Tshiluba dilinden "ilunga" olduğuna karar verilmiştir. İlunga "Kötü bir davranışı ilk seferinde affetmeye, ikinci seferinde tolerans göstermeye hazır olan ama üçüncüsünde asla affetmeyecek ya da tolerans göstermeyecek kişi" anlamına gelmektedir.

—BBC Haberler

Eğer ilk seferinde başaramazsan / Dene tekrar dene.

—T.H. PALMER

Şimdilerde kablolu kullanım daha kolay olsa bile cihazlarımıza

kablosuz olarak bağlantı kurmak istemekteyiz: Bir bilgisayarla birkaç santimetrelik mesafeden kablosuz olarak bağlanan klavye ve farelerimiz gibi. Hâlbuki kablosuz ağlar bir gereksinim sonucu ortaya çıkmıştı: Kabloların işe yaramayacağı yerler için, Hawaii gibi. 60'ların sonlarıyla 70'lerin başlarında Honolulu'daki Hawaii Üniversitesi'nden Norman Abramson dört ada ve yüzlerce millik bir alana yayılmış olan üniversitenin yedi kampüsünü ve birçok araştırma enstitüsünü birbirine bağlamaya çalışmaktaydı. Telefon sisteminden ziyade telsiz üzerinden paket değişimini uygulamaya koyma ve adaları alıcı ve vericilerden oluşan bir sistemle bağlama fikrini geliştirdi. Bu sistem daha sonraları ALOHAnet olarak bilinecekti.

ALOHAnet'in üstesinden gelmek zorunda kalacağı en büyük engel, sinyallerin birbirlerine karışmasıydı. Bazen iki istasyon aynı anda gönderme yapıyordu ve sinyalleri karışmaktaydı. (Bu elbette ki insanların karşılıklı konuşmalarında da olan bir şeydir.) Eğer bu istasyonlar mesajlarını karşıya iletmek adına hemen yeniden gönderme yaparsa bu durum onları sonsuza kadar sıkışıp kalacakları bir duruma sokabilirdi. ALOHAnet protokolünün açık bir şekilde, birbirleriyle çakışan sinyallere birbirlerine nasıl yer ve öncelik vereceklerini söylemeye ihtiyacı olacaktı.

Burada göndericilerin yapması gereken ilk şey “simetriyi bozmak” denilen şeydir. Kaldırımda yürümekte olan her yayanın da bildiği gibi karşıdan gelen sola doğru hamle yaparken sizin sağa doğru, karşınızdaki sağa doğru hamle yaparken sizin sola hamle yapmanız hiçbir işe yaramayacaktır. İki konuşmacı aynı anda susup diğerine konuşma için fırsat tanıyıp sonra aynı anda konuşmaya başlaması ya da kafa kafaya gelmiş iki arabanın birbirine yol vermek için aynı anda durup sonrasında aynı anda hareketlenmesi de aynıdır. Burası, rastlantısallık kullanımının gerekli olduğu alanlardan biridir. Aslında iletişim ağı yönetimi rastlantısallık olmaksızın mümkün olmazdı.

Bu konudaki ilk çözümlerden biri her istasyonun yazı tura atması yaklaşımıdır. Eğer yazı gelirse gönderimini yapar, tura gelirse bir tur bekler daha sonra gönderimini yapar. Büyük olasılıkla çok beklenmeden gönderiler yapılacaktır. Bu işlem sadece iki gönderici olduğu durumlarda yeteri kadar işe yaramaktadır. Peki, ya aynı anda gönderim yapan üç sinyal olursa? Ya da dört? O durumda her paketin geçme şansı dörtte bir olacaktır (bir gönderim yapılırsa bile hâlen birbiriyle çakışmış üç ileti olacaktır ve belki de bu sırada daha başka çakışan sinyaller de bunlara katılacaktır). Çakışan bu iletilerin sayısı daha da arttıkça ağın verimliliği süratle düşecektir. ALOHAnet hakkında 1970’de hazırlanan bir rapor, yayın araçlarının (radyo, TV, telsiz vb.) ortalama yüzde 18,6’nın biraz üzerinde kullanıldığı durumlarda “ağın istikrarsız bir hâl aldığını... ve yeniden yapılan iletimlerin sayısının sınırsız olduğunu” belirtmiştir. Bu, iyi değildir.

Peki, o zaman ne yapmak gerekir? Sistemin bu kaderden kurtulmasının bir yolu var mıdır?

Çığır açan bu buluş, birbirini izleyen her başarısızlık sonrası ortalama gecikmenin arttığı bir hâl aldı. Özellikle yeniden iletimi denemeden önceki gecikme süresi iki katına çıkmaktaydı. Bu nedenle ilk başarısızlıktan sonra bir gönderici bir ya da iki tur sıra bekleyecek, ikinci başarısız denemeden sonra bir ila dört arası sıra bekleyecek, üçüncü başarısız denemeden sonra ise 1 ila 8 tur arası bir sayıda bekleyecekti ve bu böyle devam edecekti. Bu yaklaşım ağın birbiriyle çakışan çok sayıda sinyalle baş etmesine olanak tanımaktaydı. Maksimum gecikme uzunluğu (2, 4, 8, 16, ...) üstel bir şekilde artış sergilediği için bu yaklaşım **Üstel Geri Çekilme** olarak tanınmaktadır.

Üstel Geri Çekilme ALOHAnet’in 1971’den itibaren başarılı işleyişinin önemli bir parçası oldu ve 1980’lerde TCP’ye dâhil edildi. Giderek internetin önemli bir parçası oldu. Geçen bunca seneden sonra da durum hâlen öyledir. Önemli bir yazıda belir-

tildiği gibi, “Bilinmeyen bir topolojide (ÇN: Ağ topolojisi, ağdaki bilgisayarların nasıl yerleşeceğini, nasıl bağlanacağını, veri iletiminin nasıl olacağını belirler.) yer alan ağa gömülü bir uç nokta için olan ve bilinmeyen, bilinemez ve sürekli değişen sayıdaki çakışan görüşmelerle birlikte olan bir ileti için işe yarama umudu olan sadece tek plan vardır: Üstel geri çekilme.”

Fakat daha kuralcı ve daha etkin bir yöntem öneren şey de algoritmanın diğer kullanım şeklidir. Sadece çakışmalardan kaçınmaya çalışmanın ötesinde, Üstel Geri Çekilme ağlarla ilgili hemen her türdeki hata ya da sorunla başa çıkmanın varsayılan yolu hâline gelmiştir. Örneğin, bilgisayarınız sorunlu gibi görünen bir web sitesine ulaşmaya çalışırken Üstel Geri Çekilmeyi kullanmaktadır: Bir saniye sonra yeniden dener, birkaç saniye sonra yeniden ve bu böylece sürer gider. Bu herkes için iyi haber demektir. Sıkıntıda olan bir sunucuyu tekrar çevrim içi olduğu anda gelecek taleplerle tıkanmaktan korur ve cihazınızın çok çok az bir fayda sağlamak uğruna aşırı derecede kaynak harcamasına engel olur. Fakat ilginç bir şekilde cihazınızın tamamen vazgeçmesine de izin vermez ya da buna zorlamaz.

Üstel Geri Çekilme aynı zamanda ağ güvenliğinin çok önemli bir parçasıdır. Bir hesaba giriş için ardı ardına gelen hatalı şifreler üstel olarak artan bir kilitlenme periyoduyla cezalandırılır. Bu durum bir “hackerın” bir hesaba karşı şansı yaver gidene kadar art arda şifre deneyerek “sözlük saldırısı (dictionary attack)” yapmasına engel olur. Aynı zamanda bir başka sorunu da çözer. Hesabın gerçek sahibi, ne kadar unutkan olursa olsun, asla sistemin dışına itilmez.

Genellikle insanlara art arda sınırlı sayıda şans tanıma, sonrasında ise tamamen vazgeçme eğilimindeyiz. Üç kez hata yaparsanız, oyun dışı kalırsınız. Bu davranış şekli affedilme, hoşgörü ya da tahammül gerektiren hemen her durumda yaygındır. Kısacası, belki de bunu yanlış şekilde uygulamaktayız.

Arkadaşlarımızdan biri geçenlerde, yapılan sosyal planlara son anda gelmeyeceğini bildirmek gibi rahatsız edici bir alışkanlığa sahip çocukluk arkadaşı hakkında kafa patlatmaktaydı. Ne yapılabilirdi? Ona yeteri kadar müsamaha gösterildiğine karar verip ilişkiyi tamamen sonlandırmanın aşırı derecede keyfi ve ağır bir yaptırım olacağını düşünüyordu. Lakin sürekli olarak planları yeniden düzenlemek safçaydı, hayal kırıklığı ve zaman kaybına neden oluyordu. Çözüm: Davet oranlarında bir Üstel Geri Çekilme. Önce bir hafta, sonra iki, sonra dört ve sonrasında da sekiz hafta sonra yeniden bir araya gelmek için plan yapın. Yeniden bir araya gelme oranı sıfıra doğru ilerler ve tamamen vazgeçmemiş olursunuz.

Bir başka arkadaşımız madde bağımlısı bir aile ferdine kalacak yer bulma ve maddi yardımda bulunup bulunmama konusunda karar vermede sıkıntı yaşamaktaydı. Bu kişinin işleri iyi yönde değiştireceği konusundaki umuduna bir son vererek ona sonsuza kadar sırtını dönme düşüncesine katlanamıyordu. Fakat evinin ve yaşamının kapılarını açmak için yapması gerekenleri -ona kıyafetler almak, onun için her gün yemek yapmak, onun için banka hesaplarını yeniden açmak ve onu her sabah işe götürmek gibi- yapmak ve saçma bir anda tüm parayı alıp ortadan kaybolması, haftalar sonra yeniden arayarak af dileyip yeniden kabul edilmeyi beklemesi düşüncesine de katlanamıyordu. Bir paradoks gibi görünmekteydi: Zalimce ve imkânsız gibi görünen bir seçim.

Üstel Geri Çekilme bu gibi durumlarda sihirli bir değnek değildir ama ilerleme kaydetmek için iyi bir yol sunar. Örneğin üstel olarak uzayan bir ayık kalma süresi istemek evin kurallarını yeniden çiğnememek adına bir teşvik olabilir. Sorunlu olan bu aile üyesini o yoldan cidden ayrıldığını ispatlamaya daha da şiddetli şekilde itecek ve ev sahibini döngünün sürekli stresinden koruyacaktır. Belki de en önemlisi ev sahibi aile ferdine, ona

sonsuz kadar sırtını dönmediğini söylemek ya da affedilmek için artık çok geç olduğunu söylemek durumunda kalmayacaktır. Bu, sınırlı bir sabır ve sınırsız bir af sunmanın bir yoludur. Belki de seçim yapmamız gerekmemektedir.

Aslında geçen son on sene, adalet sisteminin uyuşturucu suçu işleyenlerle uğraşma yöntemindeki sessiz bir devrimin başlangıcına şahitlik etmiştir. Bu devrime ALOHAnet'in Üstel Geri Çekilme prensiplerini kullanan ve şaşırtıcı bir tesadüfle ALOHAnet'in doğduğu yer olan Honolulu'da başlamış olan HOPE (umut) isimli pilot bir program öncülük etmektedir.

Hâkim Steven Alm, Hawaii'nin Birinci Ceza Mahkemesi'nde göreve başlamasından kısa bir süre sonra dikkat çekici bir davranış kalıbı farkettiler. Şartlı tahliyeyle dışarı çıkanlar tekrar tekrar şartlı tahliye koşullarını ihlal etmekte ve ceza mahkemesi hâkimleri de bir uyarıyla kurtulmalarını sağlayacak şekilde yetkilerini kullanmaktaydı. Ancak bir noktada (belki de 12 kez ihlalden sonra) hâkim katı davranmaya karar veriyor ve yıllarla ölçülen boyutta ceza veriyordu. Alm, bu konuda "Bir kişinin davranışını değiştirmek için ne kadar çılgınca bir yol diye düşünmüştüm" demişti. Alm, bu nedenle neredeyse bu olanların tam tersini teklif etti. HOPE gelecekte çok uzak tarihlere planlanan, belirsiz karar talepleri içeren ve genellikle çok büyük cezalarla sonuçlanan duruşmaların yerine sadece bir gün hapisle başlayan ve her olaydan sonra artan, önceden belirli cezalara dayanmaktadır. Adalet Bakanlığı'nın beş yılı kapsayan bir çalışmasına göre HOPE kapsamındaki şartlı tahliye edilen mahkumların yeni bir suç ya da şartlı tahliye kurallarını çiğnemediği dolaylı tutuklanma ihtimalleri sıradan şartlı tahliye edilmiş mahkumların yarısı kadardır. Bu kişilerin uyuşturucu kullanma ihtimalleri de yüzde 72 daha azdır. 17 eyalet Hawaii'nin izinden gitmiş ve kendi HOPE versiyonlarını başlatmışlardır.

Akış Kontrolü ve Tıkanıklıktan Kaçınma

Bilgisayar ağlarındaki ilk çalışmalar güvenilir olmayan bağlantılar üzerinden güvenilir iletimler tesis etmeye odaklandı. Bu çabalar o kadar başarılı oldu ki hemen arkasından ikinci bir konu ortaya çıktı: Aşırı derecede yüklü olan bir ağın felaket bir şekilde çökmeden çalışmasını temin etmek. TCP veriyi A noktasından B noktasına iletme sorununu çözer çözmez bu sefer de kördüğüm şeklinde tıkanma sorunuyla karşılaştı.

En önemli erken uyarı 1986'da aralarındaki mesafe bir futbol sahası kadar olan Lawrence Berkeley Laboratuvarı ile Berkeley Üniversitesi kampüsünü bağlayan bir hat üzerinde gözlemlendi. (Berkeley'de aradaki bu boşlukta gerçekten bir futbol sahası vardır.) Bir gün o hattın bant genişliği genelde saniyede 32.000 bit olan değerinden saçma bir şekilde saniyede sadece 40 bite düştü. Olayın kurbanı olan LBL'den Van Jacobson ile UCB'den Michael Karels "Bant genişliğindeki bin faktörlük ani düşüşten çok etkilenmişler ve işlerin neden bu kadar kötü olduğunu araştırmaya koyulmuşlardı."

Bu sırada aynı şeyle karşılaşmakta olan ülkenin diğer ağlarının da aynı konudan bahsettiklerini duydular. Jacobson arka planda çalışan koda baktı: "Protokolde hata mı var?" diye merak etti. "Bu şey küçük çaplı testlerde işe yarıyordu ama daha sonra birdenbire çöktü."

Devre anahtarlama ile paket değişimi arasındaki en büyük farklardan biri tıkanıklıklarla nasıl başa çıktıkları konusunda ortaya çıkmaktadır. Devre anahtarlama da sistem bir kanal talebini ya onaylar ya da bu talep yerine getirilemeyecekse hemen reddeder. Eğer çok yoğun olduğu bir sırada telefon hatlarını kullanmaya çalıştıysanız özel bir tondan sonra tüm hatların dolu olduğu mesajını almanızın nedeni budur.

Paket değişiminde durum bundan oldukça farklıdır. Telefon sistemleri *dolar*, e-posta sistemleri ise *yavaşlar*. Bir göndericiye

sistemde başka kaç gönderici olduğunu ya da şebekenin herhangi bir anda ne kadar tıkanık olduğunu söyleyebilecek bir şey yoktur. Bu nedenle gönderen ve alıcı sadece iletişim kurmamalı, aynı zamanda meta iletişime de geçmelidirler: Verinin ne kadar hızlı gönderilmesi gerektiğini belirlemeleri gerekir. Karışık paket akışları -belirli bir yönetim ya da koordinasyon olmaksızın- hem birbirlerinin yolundan çekilmeli hem de süratle yeni açılacak alanlardan istifade etmelidirler.

Jacobson ile Karels'in araştırmacı çalışmasının sonucunda ortaya çıkan, TCP'de 40 yıldaki en büyük değişikliklerden biri olan bir dizi revize edilmiş akış kontrol ve tıkanıklık önleyici algoritmaydı.

TCP'deki tıkanıklık kontrolünün merkezinde **Toplanarak Artan Çarpılarak Azalan (Additive Increase, Multiplicative Decrease, AIMD)** isimli bir algoritma yer alır. AIMD devreye girmeden önce yeni bir bağlantı iletim oranını agresif bir şekilde artıracaktır. Eğer ilk paket başarılı bir şekilde teslim edilirse iki tane daha gönderir, eğer bu ikisi de giderse dört taneden oluşan bir grup daha gönderir ve bu böyle devam eder. Fakat herhangi bir paketin ACK'sı göndericiye gelmediği anda AIMD algoritması devreye girer. AIMD işlerken, tam olarak iletilen herhangi bir paket grubu gönderilecek paket sayısını iki katına çıkarmaz sadece bir artırır ve başarısız olan iletimler ise iletim oranını yarıya indirir (isminin nedeni budur). Kısacası AIMD "Biraz daha, biraz daha, biraz daha, hoop çok fazla oldu, biraz geri, biraz daha..." diyen bir kişinin görevini üstlenir. Bu da bizi "TCP testere dişi" olarak bilinen karakteristik bir bant genişliği şekline götürür: Sürekli ve düzenli yükselişler ve arada keskin düşüşler.

Neden bu kadar keskin ve asimetrik bir düşüş vardır? Jacobson ile Karels'in de açıkladığı gibi, AIMD'nin ilk devreye girdiği an, bir bağlantının agresif olan ilk hızlanma sürecinde kesilen ya da kaybolan ilk paket olayını yaşadığı andır. İlk aş-

ma her bir başarılı gönderimde iletim oranını iki katına çıkarma işlemini içerdiğinden bir sorun olduğunda hızı yarıya indirmek tam olarak uygun bir hareket şeklidir. Ve bir gönderi süreci başladığında eğer yine başarısız olma durumuna düşerse bunun nedeni muhtemelen bir başka yeni bağlantının ağ için rekabet ediyor olmasıdır. Bu durumun en muhafazakâr değerlendirmesi de -tam olarak anlatmak gerekirse siz ağı kullanan tek kişiydiniz ve şimdi artık kaynakların yarısını kullanan bir başka kişi var- aynı zamanda hızın yarıya inmesine neden olmaktadır. Buradaki muhafazakârlık gereklidir. Bir ağ ancak aşırı yük altında olmasına rağmen kullanıcıları işlerini halledebiliyorsa istikrarlı bir hâl alabilir. Aynı nedenle, sadece toplamalı bir artış aşırı derecede hızlı yüklenme ve düzelme döngülerini önleyerek işlerin herkes için istikrarlı bir hâl almasına yardımcı olur.

Toplamalı ve çarpımlı hareket tarzları arasındaki kesin ayrım doğada çok da karşımıza çıkan cinsten bir şey olmamasına karşın TCP testere dişi şekli, bir kişinin güvenli şekilde işlerini halledebileceği kadar yük alması fikrine dayanan alanlarda kendisine karşılık bulur.

Örneğin 2012 senesinde şans eseri icra edilen bir iş birliğinde Stanford’lı çevre bilimci Deborah Gordon ile bilgisayar mühendisi Balaji Prabhakar, karıncaların akış kontrol algoritmalarını insanlardan milyonlarca yıl önce geliştirmiş olduklarını keşfettiler. Tıpkı bir bilgisayar ağı gibi bir karınca kolonisi de karıncaların gidiş gelişlerini başarılı bir şekilde sürdürebilmek maksadıyla, hızı etkileyen çeşitli koşullar altında “akışlarını” yönetme konusunda bir tahsis problemiyle karşılaşmaktadır (burada karıncaların akışı yemek arayışı içindir). Ve tıpkı internetteki bilgisayarlar gibi karıncalar da bu ortak sorunu merkezi bir karar verici olmaksızın, bunun yerine Gordon’ın “otoritesiz kontrol” olarak adlandırdığı şeyi geliştirerek çözmek zorundadırlar. Karıncaların çözümünün de benzer olduğu ortaya çıkmaktadır: Başarılı yiye-

cek arayışları yuvadan daha fazla karıncanın çıkmasına neden olurken başarısız gidiş gelişler ise çıkışların azalmasına neden olmaktadır.

Diğer bazı hayvan davranışları testere şeklindeki karakteriyle TCP akış kontrolünü akla getirmektedir. İnsan yiyecek artıklarının peşine düşen sincaplar ile güvercinler her seferinde ileri doğru bir adım atar, daha sonra genellikle biraz geri çekilir ve sonrasında sürekli bir hareketle yeniden ileriye yönelirler. Ve belki de insanların iletişimi de benzer bir şekilde görünmektedir: Her metin mesajı ya da e-posta bir diğerini teşvik ederken geri dönüş yapılmayan her mesaj ise akışı durdurmaktadır.

AIMD daha genel olarak sınırlı kaynaklarımızı belirsiz ve dalgalı durumlarda tahsis etmemiz için mücadele ettiğimiz yaşamımızdaki pek çok alan için bir yaklaşım önerir.

1960’larda eğitim alanında profesör olan Laurence J. Peter tarafından geliştirilen hicivli “Peter Prensibi (Peter Principle)” “her çalışanın kendi yetersizlik düzeyini artırma eğiliminde olduğunu” belirtmektedir. Buradaki düşünce, hiyerarşik bir organizasyonda verimli şekilde çalışan herhangi bir kişinin daha karmaşık ve/veya daha farklı zorluklar içeren yeni bir göreve terfi ile ödüllendirileceğidir. En sonunda bu çalışan yeteri kadar iyi performans sergilemediği bir yere geldiğinde yükselişi duracak ve kariyerinin kalanı boyunca bu rolde kalacaktır. Bu bakış açısı genele uygulandığında, Peter Prensibinin açıkça ortada olan mantığına göre organizasyondaki her pozisyon, o işi kötü şekilde yapan kişilerce işgal edilmiş olacaktır. Peter’in bu formülasyonundan 50 yıl kadar önce İspanyol filozof Jose Ortega y Gasset 1910’da aynı duyguları dile getirmişti. “Her kamu çalışanı çok acil olarak bir alt göreve indirilmelidir çünkü yetersiz olana kadar terfi ettirilmiş durumdadır.”

Bazı organizasyonlar Peter Prensibini, ilerleme kaydetmeyen çalışanlarını işten çıkararak kullanmaya çalışmışlardır. Önde

gelen hukuk firması Cravath, Swaine&Moore tarafından geliştirilen sözde Cravath Sistemi; neredeyse tamamen yeni mezunları işe almayı, onları en alt seviyedeki işlere yerleştirmeyi ve daha sonra gelecek olan yıllarda rutin olarak onları ya terfi ettirmeyi ya da kovmayı içermektedir. ABD Silahlı Kuvvetleri 1980’de, Savunma Bakanlığı Subay Personel Yönetim Politikası olarak benzer bir “yüksel ya da git” politikası benimsedi. İngiltere de benzer şekilde “insan gücü kontrolü” dedikleri oldukça büyük tartışmalara neden olan bir taktik izledi.

Peter Prensibi ile gaddar “yüksel ya da git” prensibinin bir orta yolu ya da bir çözümü mevcut mudur? AIMD algoritması böyle bir yaklaşım önerebilir çünkü tam olarak dengesiz bir ortamın taleplerini karşılamak üzere tasarlanmıştır. Bir bilgisayar ağı kendi maksimum gönderim kapasitesiyle birlikte önceden tahmin edilemeyecek şekilde dalgalı olabilen müşterilerinin gönderim oranlarını da yönetmelidir. Bir işletme ortamında benzer bir şekilde şirketin ödemelerini gerçekleştirmek için sınırlı bir fon havuzu bulunmaktadır ve her işçi ya da bayinin yapabileceği sınırlı bir iş miktarıyla baş edebilecekleri sınırlı miktarda sorumlulukları vardır. Herkesin ihtiyaçları, kapasiteleri ve ortaklıkları her daim dalgalanma içindedir.

TCP testere dışından alınacak ders, değişen ve tahmin edilemeyen bir ortamda bir şeyleri başarısızlık noktasına doğru itmek aslında bazen kaynaklardan en iyi şekilde istifade etmenin en iyi (ya da mevcut tek) yoldur. Önemli olan şey başarısızlığa verilen karşılığın hem kesin hem de dirençli ve esnek olduğundan emin olmaktır. AIMD uygulanırken başarısız olmayan her bağlantı başarısız olana kadar hızlandırılır ve daha sonra yarıya düşürülür. Sonra da çok geçmeden tekrar hızlanmaya başlar. Ve mevcut hemen hemen tüm şirket kültürlerine ters düşse de her yıl her çalışanın ya bir basamak üste terfi ettiği, ya da gelmiş olduğu konumun yarısını kaybettiği bir sistem düşünülebilir.

Laurence J. Peter'in da öngördüğü gibi, sinsi Peter Prensibi "hiyerarşik yaşamın ilk kuralı olan; hiyerarşinin korunması ihtiyacından" dolayı şirketlerde görülür. TCP ile tam tersine esnekliğin erdemleri öğretilmektedir. Şirketler "yatay" hiyerarşi ve "dikey" hiyerarşilerden bahsederler ama aslında dinamik hiyerarşilerden de bahsetmeyi düşünebilirler. Bir AIMD sisteminde hiç kimse aşırı derecede yüklenileceği ya da kaçan bir terfinin ardından pişman olma konusunda uzun süre endişe duymaz. Her ikisi de geçici çarelerdir ve sistem her zaman her şey değişse de denge noktasının yakınlarında gezinip durur. Belki bir gün bir kişinin kariyer eğrisini değil, onun testere dişi şeklindeki seyrinden bahsederiz.

Arka Kanallar: Dil Biliminde Akış Kontrolü

Ağların akış kontrolüne bakmak, ACK paketlerinin sadece iletilerin teslimini onaylayıp alındı bilgisini vermekle kalmadığını, aynı zamanda tüm etkileşimin hatlarını, hızını ve temposunu şekillendirdiğini açıkça ortaya koyar. Bu durum bize geri beslemelerin iletişim için ne kadar önemli olduğuna dair hem bir anımsatıcı hem de bir içe bakış sağlar. Daha önceden de görmüş olduğumuz gibi TCP'de tek yönlü iletim gibi bir şey yoktur: Sürekli bir geri besleme olmadığında gönderen neredeyse hemen hızını düşürecektir.

Ağ alanında geri beslemenin rolünün öneminin giderek artan bir şekilde farkına varılmasıyla hemen hemen aynı zamanda, ilginç bir şekilde dil bilimi çevrelerinde de neredeyse aynı gelişmeler olmaktaydı. 20'nci yüzyılın ortalarında dil bilimini, dili en kusursuz ve ideal durumuyla (tüm iletişim yazılıymış gibi kusursuz bir şekilde akıcı, gramer kurallarına uyan, kesintisiz cümleleri olan) düşünen Noam Chomsky'nin teorileri domine etmekteydi. Ancak 1960'lar ve 70'lerden başlayarak konuşma dilinin uygulamadaki özelliklerine artan ilgi karşılıklı konuşmalarda

sırayla iletişimde bulunmanın, söz kesmenin ve karşıdaki dinleyicinin tepkilerine göre cümleyi daha söylerken tamamlama konusunun ne kadar detaylı ve önemli olduğunu gözler önüne serdi. Ortaya çıkan şey, tek taraflı iletişimin bile aslında iş birliği içeren bir eylem olduğunu belirten bir vizyondur. Dil bilimci Victor Yngve, 1970’de bununla ilgili olarak şu satırları kaleme alacaktı: “Aslında hem söz sahibi olan kişi hem de partneri eş zamanlı olarak hem konuşma hem de dinleme eylemi içindedir. Bu, benim arka kanal dediğim şeyin mevcudiyeti yüzündendir: Sırası gelen kişinin ‘evet’ ve ‘hı hı’ gibi kısa karşılıklar aldığı ama sırasını vermediği durumdur.”

İnsanların arka kanalları üzerine bir inceleme, iletişim dinamiklerinin baştan sona yeniden bir değerlendirmeye tabi tutulmasını sağlayarak (özellikle dinleyicinin rolü üzerine) dil bilimi alanı için tamamen yeni bir ufuk açmıştır. Örnek olarak gösterilebilecek bir çalışmada Victoria Üniversitesi’nden Janet Bavelas önderliğindeki ekip, kişisel bir hikâyeyi dinlemekte olan bir kişinin dikkati dağıldığında neler olduğunu araştırdı. Dinleyicinin algılamasına değil, hikâyeye ne olduğunu araştırdılar. Zayıf bir geri besleme geldiği takdirde hikâyenin dağıldığını fark ettiler:

Dikkati dağınık dinleyicilere zar zor hikâyeler anlatan kişiler hikâye sonlarını dramatik olması gerekenden ziyade vasatın biraz üstünde olacak şekilde anlatmışlardır. Hikâyelerinin sonları saçma ya da tutarsızdı veya hikâyenin sonunun etrafında gezinerek bu sonu birden çok defa anlatmışlardı. Genellikle açıkça ortada olan şeylerden bahsederek hikâyelerini haklı çıkarmaya çalışmışlardır.

Hepimiz, karşıımızdaki bir kişinin uzaklara -ya da belki akıllı telefonlarına- dalıp gittiği ve bizim de hikâyeye anlatımımızdaki eksikliğin mi buna neden olduğunu merak ettiğimiz konuşmalar

yapmışızdır. Aslında buradaki sebep-sonuç etkisinin tersi yönde olduğu ortaya çıkmıştır: Kötü bir dinleyici hikâyeyi mahvetmektedir.

İnsan arka kanallarının tam olarak işlev ve anlamını anlamak aktif bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir. Örneğin 2014 senesinde Santa Cruz Üniversitesi'nden Jackson Tollins ile Jean Fox Tree konuşmamızı tatlandıran bu önemsiz “hı-hı”, “evet”, “hımm”ların konuşmacıdan dinleyiciye olan bilginin akışını düzenlemede çok ayrı ve önemli bir rol üstlendiklerini (hem sürat hem de detay bakımından) göstermişlerdir. Aslında bunlar her bakımdan TCP'deki ACK'ler kadar önemlidirler. Tolins bununla ilgili olarak “Gerçekten bazı ‘hikâye anlatıcıları’ diğerlerinden kötü de olsalar, kısmen de olsa bunun için karşılarında kendilerini dinleyenleri suçlayabilirler” demektedir. Bunun farkına varmak kendisi ders verdiği zamanlarda üzerinde olan baskının bir kısmını ortadan kaldırmak gibi beklenmedik bir yan etkiye neden olmuştur. (Elbette ki bu sonuç hakkında verdiği dersler de buna dâhildir.) “Ne zaman bu arka kanallar hakkında konuşsam her zaman dinleyicilere benim o andaki konuşmama karşı kullandıkları arka kanalların söylediklerimi değiştirdiğini söylerim. Bu nedenle benim ne kadar iyi olduğumdan onlar sorumludur.”

Bufferbloating: Gecikme

Etkili bir aktif kuyruk yönetim mekanizmaları geliştirmek, kuyrukların nedeni ve anlamı hakkındaki yanlış düşünceler nedeniyle geri kalmıştır.

—Kathleen NIKOLS ve Van JACOBSON

2010 senesinin yazıydı ve Jim Gettys, diğer birçok ebeveyn gibi çocuklarından evdeki kablosuz ağın yavaş işlediğiyle ilgili şikâyetler duymaktaydı. Ancak Gettys diğer birçok ebeveynden farklı olarak HP, Alcatel-Lucent, World Wide Web Consortium

ve Internet Engineering Task Force'ta çalışıyordu. Hâlen kullanımda olan HTTP'nin 1999 yılındaki editörüydü. Bu nedenle birçok meraklı baba soruna üstünkörü bakarken o gerçekten derinliklerine baktı.

Gettys daha sonra bu konuda olanları bir oda dolusu Google mühendisine ağ jargonuyla anlattı:

Bu on milisaniyelik uzun yol üzerinden evimdeki bilgisayarımdan MIT'e eski X Konsorsiyum arşiv dosyalarını kopyalıyor ya da yeniden senkronize ediyordum. Smoke Ping, sadece bir dosya kopyalama işlemi sırasında paket kayıplarıyla birlikte ortalama bir saniyenin üzerinde olan gecikme raporları gönderiyordu. Wireshark'a baktım ve gerçekten garip olan bu davranışları gördüm... Bu, beklediğim TCP [testere dişi şekli] gibi görünmüyordu. Asla bu şekilde olmamalıydı.

Basitçe anlatmak gerekirse; bir şey görmüştü, oldukça garip bir şey. Tıpkı şu sözde olduğu gibi bir durum mevcuttu: "Bilimde yeni buluşları müjdeleyen en heyecan verici ifade 'Evreka!' değil, 'İşte bu komik'tir.'"

Gettys ilk başta modeminde bir sorun olduğunu düşündü. Ailesinin internette bir problem olarak adlandırdığı şey kendi duvarlarındaki soketteki bir trafik tıkanıklığına benzemekteydi. Boston'a ulaşması gereken paketler yolda tıkanmıyordu; daha evin içinden çıkmadan tıkanıp kalıyorlardı.

Ancak Gettys konunun daha derinlerine indikçe iyice meraklanmaya başladı. Sorun sadece onun evindeki yönlendiricisi (router) ve modemi değil, tüm evlerdeki yönlendirici ve modemleri etkiliyor gibi görünmekteydi. Ve sorun sadece ağ cihazlarında değildi; Linux, Windows ve OS X kullanan bilgisayarların, tabletlerin ve akıllı telefonların içindeydi. Ve aynı zamanda sadece kullanıcı ucundaki donanımlarda da değildi. İnternetin alt-

yapısına da sirayet etmişti. Gettys aralarında Van Jacobson ile Vint Cerf'ün de olduğu Comcast, Verizon, Cisco ve Google'dan önemli kişilerle öğle yemekleri yedi ve bulmacanın parçalarını yavaş yavaş yerine oturtmaya başladı.

Sorun her yerdeydi. Ve sorun Bufferbloat'dı.

Ara ya da tampon bellek anlamına gelen "buffer" aslında işlev arızalarını gidermek için bir kuyruk, yani bir sıradır. Eğer bir simit dükkânına başka bir müşteriyle aynı anda girerseniz, meşgul olan kasiyer birinizin dükkândan çıkmasını ve daha sonra yine gelmesini isteyebilir. Müşteriler ve yönetim elbette ki böyle bir durum yaşanmasını istemeyecektir. Diğer taraftan böylesi bir politikayla kasiyer, müşteriye yeterli derecede fayda sağlamaz. Oysa ki müşterileri sıraya sokmak dükkânın ortalama verimini *maksimum* değerine yaklaştırır. Bu da iyi bir şeydir.

Fakat böylesi üst düzey hizmet sunumunun beraberinde getirdiği maliyet bulunmaktadır: Gecikme. Tom, kızını Berkeley'deki Cinco de Mayo festivaline götürdüğünde kızının canı muzlu çikolatalı waffle çektiği için sıraya girip beklemeye başladılar. En sonunda -20 dakika geçtikten sonra- Tom'a sıra geldi ve siparişini verdi. Fakat ödemeyi yaptıktan sonra waffle almak için 40 dakika daha bekledi. (Gettys gibi Tom da kendisini çok geçmeden aileden gelen yakınmaların ortasında bulmuştu.) Siparişleri almak, waffle hazırlamaktan daha kısa sürmekteydi. Bu nedenle sipariş vermek için olan kuyruk, sorunun sadece birinci bölümüydü. En azından beklemeye değerdik çünkü müşteriler, ne için sırada olduklarını bilmekteydi. İkinci ve daha uzun olan kuyruğun sonu görünmemekteydi. Bu nedenle waffle satış standı arada bir kısa bir süreliğine sipariş almayacaklarını söyleseydi herkes için daha iyi olurdu. Müşterilere sonra gel demek herkes için daha iyi olurdu. Hem daha kısa waffle kuyrukları olurdu hem de müşteriler isterlerse başka yerlere gidebilirlerdi. Ve bu durum waffle tezgâhına tek kuruş zarara mal olmazdı çünkü ne

kadar müşterinin beklediğinden bağımsız olarak bir günde sadece yapabilecekleri kadar waffle satacaklardı.

Bu, tam olarak Jim Gettys'in evindeki modemde karşı karşıya olduğu durumun aynısıydı. Bir dosya yüklemekte olduğu için bilgisayarı modeme baş edebileceği kadar paket göndermekteydi. Modemi gerçekte yapabildiğinden çok daha fazla işle uğraşıyordu ve devasa bir kuyruk oluşmasına rağmen hiçbirini geri çevirmiyordu. Bu nedenle Gettys aynı sırada bir şey indirmeyi -bir internet sayfasını ziyaret etmek ya da e-postasını kontrol etmek- denediğinde ACK paketleri yüklemenin ardında sıkıştıyordu ve evden çıkmak için modemde sırada beklemek zorunda kalıyordu. ACK'ların web ve e-posta servislerine geri dönmeleri çok uzun sürdüğü için sunucular da buna karşılık olarak kendi hızlarını düşürüyorlardı.

Her "tamam" dediğinizde 10 ya da 20 saniye gecikmeye uğrayan bir konuşma yapmaya çalışmak gibiydi. Konuşmacı da siz onu takip etmediğinizi varsayarak hızını düşürüyordu ve sizin bu konuda yapabileceğiniz hiçbir şey yoktu.

Bir ağ bufferı dolduğunda normalde olan şeye **Tail Drop** denir: Bir noktadan sonra gelen her paketin reddedildiği ve hemen silindiğini söylemenin kaba bir yolu. (Sıra çok uzadığında waffle tezgâhından yeni müşterileri geri çevirmek, insan yaşamındaki bir Tail Drop olarak görülebilir.) Paket değişimindeki posta metaforundan devam edecek olursak o sabah kamyonuna sığmayan her paketi buharlaştıran bir postacı hayal etmek biraz garip olurdu. Ancak bir bilgisayarın paketlerinden birinin alınmadığını fark etmesini sağlayan ve AIMD'ye bant genişliğini yarıya indirmesini söyleyen şey de bu kaybolan paketlerdir. Kaybolan paketler internetin birincil geri besleme mekanizmasıdır. Aşırı derecede geniş olan bir buffer -mutfağı ne kadar eksik personelle çalışıyor olursa olsun her müşteriyi kabul eden bir restoran, göndermesinin ne kadar uzun süreceğine bakmaksızın gelen her pa-

keti kabul eden bir modem gibi- sistemin işlemesi gereken şekline engel olur.

Buffer'lar verimliliklerini maksimize etmek için temel olarak gecikmeyi kullanırlar. Yani, işlerin daha yavaş olduğu sonraki periyotlardan istifade etmek adına paketlerin (ya da müşterilerin) beklemelerini sağlarlar. Fakat sürekli olarak tam kapasiteyle çalışan bir buffer size olabilecek en kötü iki şeyi verir: Çok fazla gecikme ve hiç sonuç alamama. Eğer gelen işleri ya da çıkan pürüzleri en azından geldikleri hızla halledebiliyorsanız (ortalama olarak) o zaman işler harika gitmektedir. Ancak eğer ortalama iş yükünüz ortalama iş yapma oranınızın üzerinde ise hiçbir buffer size mucize sunmaz. Ve buffer ne kadar büyükse yardım çağrısı yaptığınız anda o kadar fazla yük üstünüzde olur. İster paketler için isterse de devamlı müşteriler için olsun bufferların temel prensiplerinden biri sadece rutin bir şekilde sıfırlandıkları zaman doğru bir şekilde çalışırlar.

Uzun yıllar boyunca bilgisayar hafızaları o kadar pahalıydı ki gereksiz bir hafıza kapasitesi olan modemler yapmak için bir neden yoktu. Bu nedenle bir modemin kaldırabileceğinden daha fazlasıyla bir kuyruk oluşturmaya imkân yoktu. Fakat bilgisayar endüstrisindeki ölçek ekonomisi hafıza donanımlarının maliyetlerini radikal bir şekilde düşürdüğünde modem üreticileri cihazlarına gigabaytlarla ölçülen büyüklükte RAM'ler vermeye başladı çünkü alabildikleri en küçük RAM bu ebattaydı. Sonuç olarak modemler, yönlendiriciler, dizüstü bilgisayarlar, akıllı telefonlar ve internetin kendi ana yapısındaki yaygın buffer cihazları; Jim Gettys bu konuda bir şey yapılması konusunda alarm düğmesine basmadan önce binlerce kat çoğaldı.

Hiç Olmamasındansa Geç Olsun Daha İyi

En temel sorununuzu bir kişi gibi düşünün. Biri sizi seviyor ama siz onu sevmiyorsunuz. Bir noktada artık bu du-

rum garip bir hâl alır. Onunla konuşmak zorunda kalırsınız, bu çok garip bir andır. O anda ne yaparsınız? Bir kişi sizi seviyor ve siz onu sevmiyorsanız? Meşgulmüş gibi yaparsınız... sonsuza kadar.

—Aziz ANSARİ

Şimdi, asladan daha iyidir.

Ama asla, genellikle hemen şimdiden daha iyidir.

—ZEN OF PYTHON

Şarkıcı Katy Perry'nin memleketi olan California eyaletinde yaşayan insanların yüzde 107'si kadar fazla Twitter takipçisi vardır. 2016'nın başları itibariyle Twitter'da en fazla takip edilen kişi olan Perry'nin 84,2 milyon takipçisi vardı. Bunun anlamı şudur: Hayranlarının yüzde 99'u ona mesaj göndermese ve ona en bağlı olan yüzde 1'lik kesim sadece yılda bir kez mesaj gönderse bile günde yine 2.225 mesaj almaktadır. Hem de her gün.

Perry'nin her mesajı geldiği sırayla cevapladığını hayal edin. Eğer günde 100 tane cevap yazabilseydi, o zaman hayranlarının cevabı bekleme süresi on yıllarla ölçülürdü. Hayranların 10 ya da 20 yıl içinde bir cevap almak yerine, hemen yanıt alma için çok küçük bir şansı tercih edeceğini düşünmek adil olur.

Perry'nin bir mekândan çıkarken ve imza ya da tanışmak için bekleyen bir hayran kitlesi arasından hızla ilerlerken bu sorunun olmadığını dikkat edin. Perry elinden geleni yapmakta, yoluna devam etmekte ve kaçan fırsatları arkasında bırakmaktadır. Vücudu kendi akış kontrolüne sahiptir. Tek bir anda birden fazla yerde olamayız. Kalabalık bir partide kaçınılmaz olarak sohbetlerin yüzde 5'ine katılabiliriz ve kalanını sonradan okuyamayız. Retinadan kaçan fotonlar daha sonra görülmek için bir sıraya girmezler. Gerçek yaşamda kaybolan bir paket sonsuza kadar yitip gitmiştir.

“Uyuşuk” terimini, söz konusu kişinin tembel, yetersiz ya da unutkan olduğunu vurgulamak için küçümseyici bir biçimde kullanırız. Ancak bu yaklaşımı taktik olarak kullanmak aşırı iş yükünün altında işleri halletmenin çok önemli bir parçasıdır.

Modern iletişimin en yaygın eleştirisi “sürekli bağlantıda” olduğumuzdur. Fakat sorun sürekli olarak bağlı olmamız değildir; aslında bağlı değiliz. Sorun bizim sürekli olarak tamponlanmış (buffered) olmamızdır. Aradaki fark çok çok fazladır.

Bir kişinin internetteki her şeye bakma, mümkün olan tüm kitapları okuması ya da mümkün olan tüm gösterileri izlemesi ihtiyacı hissetmesi duygusu bir Bufferbloat durumudur. Sevdiğiniz bir dizinin bir bölümünü kaçırsınız ve bunu bir saat, bir gün ya da on sene sonra izlersiniz. Tatile gidersiniz ve eve geldiğinizde karşınızda mektuplardan oluşan bir dağ bulursunuz. İnsanlar siz tatildeyken kapınızı çalmış ve cevap alamayınca gitmiştir. Şimdi ise siz eve geldiğinizde kapınızda sırada beklemektedirler.

E-posta, Tail Drop’un üstesinden gelmek için özellikle tasarlanmıştır. Mucidi olan Ray Tomlinson bunu şu şekilde açıklamaktadır:

O zamanlar mesaj bırakmanın gerçekten güzel bir yolu yoktu. Telefon bir noktaya kadar işe yaramaktaydı lakin aramayı cevaplamak için biri orada olmak zorundaydı. Ve eğer açan kişi sizin ulaşmak istediğiniz kişi değilse bu kişi ya bir asistan ya bir cevaplama servisi ya da bunun gibi bir şeydi. Bir mesaj bırakmak için geçmeniz gereken mekanizma işte buydu. Bu nedenle bilgisayarda bir mesaj bırakma fikrini herkes benimsedi.

Diğer bir deyişle, gönderen kişiyi asla geri çevirmeyen bir sistem istemiştik ve öyle ya da böyle elimize bir tane geçmişti. Aslında geçen 15 yılda devre anahtarlamadan paket değişimine

geçiş hareketi kendisini toplulukta kabul ettirdi. Diğerleriyle kendimiz arasına tahsisli devreler talep ederdik. Şimdi ise paketler gönderiyor ve dört gözle ACK'leri bekliyoruz. Eskiden *geri çevirirdik*, şimdiyse *öteliyoruz*.

Oldukça kötü bir üne sahip “fasılanın olmaması”, rahatsız edici bir şekilde bufferların birincil özelliğidir: Ortalama verim ve çıktıyı zirve değerine getirmek. Yaptığı şey, boş kalmayı engellemektir. E-postalarınızı yolda, tatilde, tuvalette, gecenin bir yarısında kontrol edersiniz. Asla sıkılmazsınız. Bu bufferların bir lütfudur.

Tatilde e-postaları otomatik olarak yanıtlatan kişiler kendilerine e-posta gönderen kişilere açık bir şekilde gecikmelerini söylemektedir. Daha iyi bir cevap, Tail Drop olabilir. Göndericileri ortalamanın üzerinde sırada bekleme süreleri hakkında uyarmak-tansa gelen mesajların tamamının geri çevrildiği hakkında uyarıda bulunulabilir. Ve bu durum tatillerle sınırlı olmak zorunda değildir. Bir kişinin e-posta gelen kutusu belirli bir sayıya, diyelim ki 100 e-postaya ulaştığında bu kişi, gelen tüm e-postaları reddedecek şekilde ayarlamayı düşünebilir. Bu durum faturalar ve benzer şeyler için kötü olabilir fakat sosyal davetler için çok da kötü bir yaklaşım olmaz.

Dolu bir e-posta gelen kutusu ya da sesli mesaj kutusuna rastlamak şimdilerde çağ dışı gibi görünmektedir; 20'nci yüzyıl ya da 2000'lerin başlarına nostaljik bir geri bakış gibi. Eğer gerçekten sonsuz olan hafızaya sahip son model telefonlarımızı ve bilgisayarlarımızı birbirine bağlayan ağlar hâlen işler gerçekten hızlandığında bazı paketleri kaybedip gönderemiyorsa, belki de Tail Drop'u sınırlı bir hafıza sorunu olarak ünlenmiş olarak düşünmek yerine kendi açısından amacı olan bir strateji olarak kabul etmek gerekebilir.

Ağ Bufferbloata gelince konu karmaşık ama mutlu bir hâl almakta ve ağdaki kuyruklarda temel değişiklikler yapmak için

donanım ve işletim sistemleri üreticileri tarafından girilen büyük çabaları içermektedir. Ayrıca TCP için yeni bir arka kanal önerisi de vardır: Uzun yıllardır gelen ilk iyileştirme çabası, Birleştirilmiş Tıkanma Uyarısıdır (Explicit Congestion Notification, ECN). İnterneti tüm Bufferbloat'lardan temizlemek tüm bu değişiklikleri ve yıllarca sürececek olan sabırlı beklemeyi gerektirecektir. Gettys bununla ilgili "Bu uzun vadeli bir uğraş" demektedir.

Bufferbloat'lar sonrasındaki gelecekte bakılacak çok şey bulunmaktadır. Bufferlar (doğuştan yanlarında getirdikleri gecikme kavramıyla birlikte) birçok interaktif süreç için kötüdür. Örneğin Skype aracılı bir görüşme yaptığımızda genellikle karşınızdaki kişinin üç saniye önce kaydetmiş olduğu şeye şimdi muamelesi yaparız. İnternette oyun oynayanlar için 50 milisaniyelik bir gecikme bile el bombası atma ve üzerine el bombası atılma arasındaki fark olabilmektedir. Aslında bilgisayar oyunları alanı, oyuncuların uçaklara binerek toplandıkları ve sadece tek odaya hizmet sağlayan bir ağ üzerinden birbirlerine karşı şahsen oynadıkları turnuvalar şeklinde gerçekleşecek kadar gecikmelere karşı son derece duyarlıdır. Ve aynı durum, senkronizasyonun çok önemli olduğu her şey için geçerlidir. Gettys düşük gecikme sürelerinin interaktif potansiyelinden faydalanmak isteyecek birçok yeni uygulama ve işletmelere dikkat çekmektedir. "Eğer arkadaşlarınızla birlikte müzik dinlemek istiyorsanız, büyük bir şehirde olsanız bile milisaniyeler hakkında endişe edersiniz. Bu tecrübelerimden çıkarabileceğim sonuç, mühendislerin zamanı birinci öncelik olarak düşünmeleri gerektiğidir."

Apple'dan Stuart Cheshire da gecikmelerin ağ mühendisleri için yüksek öncelik olması gerektiği fikrine katılmaktadır. "Hızlı" internet bağlantısı reklamı yapan şirketlerin sadece yüksek bant genişliğine atıfta bulunması ama düşük gecikmeden bahsetmemesinden dehşete düşmüş durumdadır. Örnek olması açısından, bir Boeing 737 ile Boeing 747'nin saatte 800 km hızla

uçtuğunu fakat ilkinin 120 yolcu taşıırken diğerinin bu rakamın üç katını taşıdığına dikkat çekmektedir. Cheshire “Peki bu durumda bir Boeing 747, Boeing 737’den üç kat ‘daha hızlı’ der misiniz? Elbette ki hayır” demektedir. Kapasite bazen önem arz eder: Büyük dosyaları aktarırken bant genişliği en önemli unsurdur. (Eğer nakledilmesi gereken çok büyük bir kargonuz varsa, bir konteyner gemisi pekâlâ bir 747 uçağının binlerce sortide taşıyabileceğini nakleder.) Ama insanlar arasındaki uygulamalar açısından kısa sürede yapılan geri dönüşler genellikle çok daha önemlidir ve burada ihtiyacımız olan şey daha fazla Concorde uçağıdır. Ve aslında gecikmeleri azaltmak ağ araştırmalarının şu anda önde gelen konularından biridir ve neler olacağını görmek çok ilginç olacaktır.

Bu arada, açılması gereken başka savaşlar ve cepheler vardır. Gettys dikkatini kısa bir süreliğine başka bir yöne çevirmekte ve resmin dışına bakmaktadır: “Sende işe yaramıyor mu? Şu an biriyle konuşuyorum ve işim bittiğinde onunla ilgileneceğim. Şimdi bitiriyoruz. Hayır, 5 GHz şu anda çalışıyor, 2,4 GHz kanalı çalışmıyor. Şu lanet olası bug. Routerı yeniden başlatacağım.” Bant genişliğimizi ve giderek artan çok fazla miktardaki akışı bırakmak ve ona hoşça kal demek için iyi bir an.

Oyun Teorisi (Game Theory)

Başkalarının Akılları Nasıl Çalışır?

İnsanların asil ve onurlu olduklarına ve bazılarının gerçekten zeki olduklarına inanmak bakımından bir iyimserim... Topluluk içindeki insanlara karşı ise biraz daha kötümser bir bakış açım var.

—Steve JOBS

Bir yatırımcı diğerine bir hisse senedi satar. Biri düşüşe geçtiğinde diğerinin yükselişe geçeceğine inanır. Ne düşündüğünüzü bildiğimi sanırım ama benim ne düşündüğüm hakkında sizin ne düşündüğünüzü bilmem. Ekonomik bir balon patlar. Müstakbel bir sevgili ne “Bir arkadaştan daha fazlası olmak istiyorum” ne de “Bir arkadaştan daha fazlası olmak istemiyorum” diyen bir hediye verir. Bir kişinin yardımcı olmak isterken istemeden de olsa birini gücendirdiği bir akşam yemeği hesabı tartışılır. Havalı görünmek isteyen biri pantolonun altına spor ayakkabı giyer. Sürüden ayrılmak isteyen biri umutsuz bir şekilde sürünün kendisini takip ettiğini görür. Bir kişi diğerine “Seni seviyorum” der, diğeri de ona “Ben de seni seviyorum” diyerek karşılık verir ve her ikisi de diğerinin bunu söyleyerek ne kastettiğini merak eder.

Bilgisayar biliminin bunlar hakkında söyleyecek nesi vardır?

Okul çağındaki çocuklara hikâye ve roman gibi eserlerde kur-
gunun planlamasında çatışma kategorileri öğretilir: İnsan-doğa,
insan-benlik, insan-insan, insan-toplum gibi. Bu kitapta şu ana
kadar öncelikli olarak ilk iki kategorideki olayları ele aldık. Ya-
ni, bilgisayar bilimi dünyanın temel yapısından ve bizim bilgiyi
işleme konusundaki sınırlı yeteneklerimizden kaynaklanan prob-
lemlerde yol göstericimiz olmuştur. Optimal duraklama prob-
lemleri zamanın geriye döndürülememesinden veya geri alına-
mamasından dolayı ortaya çıkmıştır. Araştırma/kullanma ikilemi
de zamanın sınırlı bir kaynak olmasından doğmuştur. Gevşetme
ve rastlantısallık, seyahat planlama ve aşılama gibi zorlukların
kaçınılmaz karmaşıklığıyla ilgilenmek için gerekli ve hayati stra-
tejiler olarak ortaya çıkmaktadır.

Kitabın bu bölümünde odağımızı değiştiriyor ve kalan iki
türü inceliyoruz: İnsan-insan ve insan-toplum. Aslında, bu prob-
lemler bizden kaynaklanır ve nedeni de biziz. Bu alandaki en iyi
yol göstericimiz oyun teorisi olarak bilinen bir matematik dalın-
dan gelmektedir. Oyun teorisi, 20'nci yüzyıl üzerinde önemli
etkisi olan bir alandır. Geçen yıllarda, oyun teorisi ve bilgisayar
bilimi arasındaki karşılıklı çapraz döllenme *algoritmik* oyun teo-
risi alanını üretmiştir. Bu alan ise 21'inci yüzyıl üzerinde etki
etmeye başlamıştır.

Özyineleme (Recursion)

*Şimdi, zeki bir kişi zehri kendi kadehine koyar çünkü sade-
ce bir budalanın kendisine uzatılan kadehi alacağını bilir.
Ben bir budala değilim, bu nedenle senin önündeki kadehi
seçmem. Ama sen benim bir budala olmadığımı biliyor
olmalısın ve buna güveniyor olmalısın, bu nedenle kendi
önümdeki kadehi de seçemem.*

—Prenses Gelin (THE PRINCESS BRIDE)

20'nci yüzyılın muhtemelen en etkili ekonomisti John Maynard Keynes, “başarılı bir yatırımın başkalarının beklentilerini önceden görmek” olduğunu söylemişti. Bir hisse senedinin 60 dolar seviyesinde satılması için alıcı bunu daha sonra 80 dolara satabileceğine inanan bir kişiye, 70 dolara satabileceğine inanmalıdır. Bu kişi de bunu, daha sonra 100 dolara satabileceğine inanan bir kişiye 90 dolara satabileceğine inanmalıdır. Bu şekilde bakıldığında bir hisse senedinin değeri insanların değerinin ne olduğunu düşündüğü değil, insanların değerinin ne olduğunu düşündüğü hakkında ne düşündüğü olur. Aslında, bu bile yeteri kadar uzun değildir. Keynes güzellik ve popülerlik arasında kesin bir ayırım yapmayla ilgili şunları söylemiştir:

Profesyonel yatırım, yarışmacıların yüzlerce fotoğraf arasından en sevimli altı tanesini seçmek zorunda oldukları ve ödülün seçimi bütün yarışmacıların seçimlerinin ortalama tercihlerine en yakın olan yarışmacıya verildiği gazete yarışmalarına benzetilebilir. Burada yarışmacılar kendilerine göre en sevimli olanları değil, diğer yarışmacıların en çok hoşuna gidecekleri seçmek zorundadır ve tüm yarışmacılar buna aynı bakış açısıyla bakarlar. Bu durumdaki seçim gerçekten en sevimli olanı ya da genel görüşe göre en sevimli olduğu düşünüleni seçmek değildir. Burada üçüncü bir dereceye ulaşılmıştır: Zekâmızı genel görüşün genel görüş olmasını düşündüğü şeyi anlamaya adanmışızdır. Ve ben aynı zamanda dördüncü, beşinci ve daha üst dereceleri değerlendiren kişiler olduğuna inanmaktayım.

Bilgisayar bilimi bu tarz bir akıl yürütmenin temel sınırlamalarını, “durma problemi (halting problem)” denilen şeyle göstermektedir. Alan Turing’in 1936’da ispat etmiş olduğu gibi, bir bilgisayar programı size başka programın sonsuza kadar dur-

maksızın hesaplama yapabileceğini asla kesin bir şekilde söyleyemez (o programın simülasyonunu yapıp en sona kadar gitme durumu hariç). (Bu duruma göre programcılar, yazılımlarının donup donmayacağını kendilerine söyleyebilecek otonom araçlara asla sahip olmayacaklardır.) Bu durum tüm bilgisayar bilimindeki temel sonuçlardan biridir ve birçok kanıtta bunu desteklemektedir.* Kısaca belirtmek gerekirse, ne zaman bir sistem -ister bir makine olsun isterse bir zekâ- bir şeyin çalışmasını kendisi kadar karmaşık bir şekilde simüle etse, kaynaklarının tamamen kullanıldığını görür. Bilgisayar mühendislerinin muhtemelen sonsuz olan bu aynalar odası seyahati için bir terimleri bulunmaktadır: “Özyineleme”.

James Bond *Casino Royale* filminde “Pokerde asla kendi elini oynamazsın, karşındaki kişinin elini oynarsın” der. Aslında gerçekte oynadığınız şey teorik olarak sonsuz bir yinelemedir. Kendi eliniz ve karşınzdakiinde olduğuna inandığınız el vardır. Ayrıca karşınzdakiinin sizin elinizde olduğuna inandığına inandığınız eliniz vardır ve... bu böyle sürer gider. Dünyanın en iyi poker oyuncularından Dan Smith şöyle demektedir: “Bunun gerçekten bir oyun teorisi terimi olup olmadığını bilmiyorum ama poker oyuncuları buna ‘seviyelendirme’ der. Birinci seviye ‘Biliyorum’dur. İkinci seviye ‘Bildigimi biliyorsun’dur. Üçüncü seviye ‘Bildigimi bildigini biliyorum’dur. Bazen şöyle durumlarla karşılaşrsınız: ‘Evet, burası blöf yapmak için gerçekten çok aptalca bir nokta ama eğer o burasının blöf yapmak için aptalca bir yer olduğunu biliyorsa o zaman oyunu görmeyecektir ve o zaman da burası blöf yapılacak zekice bir nokta olur.’ Böyle şeyler olmaktadır.”

Üst düzey poker oyunlarındaki en hatırlamaya değer blöfler-

* Aslında bu, modern bilgisayarların tümünün başlangıcıdır. Karmaşık matematiksel hesaplamaların bilgisayarlar tarafından şimdilerde Turing makinesi dediğimiz şey aracılığıyla resmi bir şekilde tanımlaması için Turing’e ilham kaynağı olan şey durma problemidir.

den biri, Tom Dwan tarafından *Texas Hold'Em* oyununda olabilecek en kötü elle -2 ve 7 ile- karşısında yer alan Sammy George'a kelimenin tam anlamıyla elinde ne olduğunu söyleyerek 479.500 dolar riske girdiğinde yapılmıştı. George "Elinde 2 ve 7 yok" diye karşılık verdi, "Elinde 2 ve 7 yok". George oyundan çekildi ve Dwan -evet, 2 ve 7'li ile- o potu aldı.

Pokerde yineleme tehlikeli bir oyundur. Elbette ki rakibinizden bir adım geride yakalanmak istemezsiniz ama çok önünde olmamak için de bir zorunluluk durumu mevcuttur. Poker ustası Vanessa Rousso şöyle demektedir: "Rakibinizden sadece bir seviye üstte oynamak isteyeceğinize dair bir kural vardır. Eğer rakibinizden aşırı derecede yukarıda oynarsanız aslında sahip olmadıkları bir bilgiye sahip olduklarını düşünürsünüz ve eylemlerinizi den çıkarmalarını istediğiniz bilgiyi sizden çıkaramayacaklardır." Poker profesyonelleri bazen bilerek rakiplerini çok kıvrımlı bir yineleme içine doğru yemlerler ve bu sırada kendileri tamamen kitaba göre, psikolojik olmayan poker oynarlar. Bu durum pokerde rakiplerini "kendi kendilerine karşı bir seviyelen-dirme savaşına" sürüklemek olarak bilinir.

(Bir rakibi sonuçsuz bir yinelemeye çekmek diğer oyunlarda da etkili bir strateji olabilir. İnsanın makinelere karşı olduğu tarihteki en renkli, garip ve büyüleyici satranç anlarından biri Amerikalı büyük oyuncu Hikaru Nakamura ile önde gelen bilgisayar satranç programı Rybka arasındaki gösteri karşılaşmasında 2008'de yaşandı. Tarafların tüm hareketlerini yapmak için üç dakikaları olduğu, aksi takdirde otomatik olarak oyunu kaybettikleri bir oyunda avantaj elbette her saniyede milyonlarca pozisyonu değerlendirebilen ve hiçbir kasını oynatmak zorunda kalmadan hamlelerini yapabilen bilgisayar tarafında gibi görünmekteydi. Fakat Nakamura hemen tahtayı kilitledi ve mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde birbirini tekrar eden, anlamsız hamleler yapmaya başladı. Bu sırada bilgisayar, Nakamura'nın gelecekte-

ki muhtemel hamlelerini tahmin edebilmek için değerli zamanını harcadı. Nakamura ise bu sırada rahat rahat oturmaktaydı. Bilgisayar zamanının tamamını neredeyse tükettiğinde ve zamana karşı yenilmemek için kontrolsüz bir şekilde hamleler yapmaya başlayınca Nakamura oyunu açtı ve onu dağıttı.)

Yinelemenin tehlikeleri göz önüne alındığında profesyonel poker oyuncuları bundan nasıl kurtulmaktadır? Oyun teorisini kullanırlar. Dan Smith bununla ilgili şu açıklamayı yapmaktadır: “Bazen dengeleyici oyunlar oynamak için sebepler bulabilirsiniz fakat çoğunlukla gerçekte sadece parazit denebilecek nedenlerle daha alt seviyedeymiş gibi oyunlar oynarsınız. Birçok durumda temel bir anlayış düzeyine sahip olmak için çok çalışırım... Her zaman Nash’in ne olduğunu bilerek ya da bilmeye çalışarak oyna başlarım.”

Peki, Nash *nedir*?

Denge Noktasına Ulaşmak

Kuralları biliyorsunuz, ben de biliyorum...

Oyunu biliyoruz ve onu oynayacağız.

—Rick ASTLEY

Oyun teorisi inanılmaz derecede geniş bir iş birliği ve rekabet senaryoları yelpazesini kapsar fakat bu alan, açık pokere benzeyen bir alanda başlamıştır: Bir oyuncunun kazancının diğerinin kaybı olduğu iki kişilik yarışmalar. Bu oyunları analiz eden matematikçiler *denge* denen bir durumu tespit etmeye çalışırlar: İki oyuncunun da karşısındakinin stratejisini bilerek değiştirmeyi istemeyeceği stratejiler seti. Buna denge denir çünkü kararlıdır. Gelecekle ilgili olarak sağlanacak hiçbir bilgi oyuncunun tercihi ni değiştirmeyecektir. Senin stratejin göz önüne alındığında ben kendi stratejimden memnunum ve sende benim stratejimi göz önüne aldığında kendi stratejinden memnunsun.

Örneğin taş-kâğıt-makas oyununda denge bize (belki de çok heyecanlı olmayacak bir şekilde), tamamen rastgele bu üç el hareketinden birini, oyunun kabaca toplam üçte birinde seçmemizi söyler. Aslında bu dengeyi sürekli kılan şey, oyuncuların bu $(1/3 - 1/3 - 1/3)$ stratejiyi kabul ettikten sonra stratejiye sadık kalmaktan başka yapacak daha iyi bir şeyinin olmamasıdır. (Daha çok taş yapmayı denersek rakibimiz bunu kısa zamanda fark edecek ve daha çok kâğıt yapmaya başlayacaktır, bu da bizim daha çok makas yapmamıza neden olacak ve bu böyle devam ederek en sonunda $1/3 - 1/3 - 1/3$ dengesi kurulana kadar devam edecektir.)

Oyun teorisindeki çılgır açan sonuçlardan birinde matematikçi John Nash 1951’de her iki oyunculu oyunun, en az bir denge noktası olduğunu kanıtlamıştır. Bu büyük buluş Nash’e 1994 senesinde ekonomi alanında Nobel ödülünü kazandıracaktı (ve Nash’in yaşamı hakkındaki *Akıl Oyunları [A Beautiful Mind]* isimli kitap ve filme konu olacaktı). Böylesi bir dengeden şimdilerde “Nash Dengesi” olarak bahsedilmektedir: Dan Smith’in her daim takip etmeye çalıştığı “Nash”.

Görünüşe bakılırsa bir Nash dengesinin iki oyunculu oyunlarda her zaman var olması gerçeği, poker ve buna benzer diğer birçok mücadeledeki yinelemeler için de bize biraz rahatlık sağlar gibi görünmektedir. Kendimizi tekrar ve tekrar çukura düşer gibi hissediyorsak, akıllıca oynadığını varsayarak karşımızdakinin kafasından dışarı çıkıp dengeyi aramak gibi bir seçeneğimiz her zaman vardır. Taş-kâğıt-makas oyununda rakibinizin yüzünü bir sonraki hamlesinin ne olabileceğine dair işaretler için dikkatlice incelemek, sadece rastgele oynamanın uzun vadede yenilmez bir strateji olduğunu biliyorsanız verilen emeğin karşılığı olmayabilir.

Nash dengesi, daha genel olarak herhangi bir dizi kural ya da teşviklerin uzun vadedeki istikrarlı sonucunun bir tahminini su-

nar. Aslında, genel olarak sosyal politikanın yanı sıra ekonomik politikayı hem şekillendirmek hem de tahmin etmek için çok değerli bir araç sağlar. Nobel ödüllü ekonomist Roger Myerson, Nash dengesi için şöyle demektedir: “Nash dengesinin ekonömi ve sosyal bilimlerde, DNA yapısının keşfinin biyoloji bilimindeki etkisiyle karşılaştırılabilecek temel ve büyük bir etkisi vardır.”

Bilgisayar bilimi bu hikâyeyi karmaşıktırmıştır. Daha geniş bir şekilde anlatmak gerekirse matematik alanındaki çalışmaların konusu *gerçek* iken bilgisayar bilimindeki çalışmaların konusu *karmaşıklık*tır.

Oyun teorisi bağlamında, bir dengenin var olduğunu bilmek bize gerçekte onun ne olduğunu ya da buna nasıl ulaşılabileceğini söylememektedir. Berkeley’den bilgisayar mühendisi Christos Papadimitriou’nun da yazısında bahsettiği gibi oyun teorisi “denge durumunun nasıl yakalanacağını hiç dikkate almadan tarafların denge davranışlarını tahmin eder. Bu, bir bilgisayar mühendisinin en önemli kaygısı olacak bir düşüncedir.” Stanford’dan Tim Roughgarden Nash’in bir dengenin her zaman var olduğunu ispatlamasıyla ilgili memnuniyetsizlik duygusunu şu şekilde yinelemektedir: “Tamam ama bizler bilgisayar mühendisiz, değil mi? Bize kullanabileceğimiz bir şeyler verin. Bana sadece orada olduğunu söylemeyin, bana onu nasıl bulacağımı da söyleyin.” Bu şekilde orijinal oyun teorisi algoritmik oyun teorisinin atası olmuştur. Yani, teorik olarak ideal stratejiler üzerine çalışmalar makinelerin (ve insanların) oyunlar için nasıl stratejiler ürettiğinin çalışması hâline dönüşmüştür.

Nash dengesi ile ilgili çok fazla soru sorulması bizi hızlı bir şekilde hesaplama sorunları konusuna getirdi. 20’nci yüzyılın sonuyla birlikte bir oyunun birden fazla denge noktası ya da bir oyuncuya belirli bir kazanç sağlayan bir denge noktası veya belirli bir hareket tarzını izleyen bir denge noktası olup olmadığına karar verme sorularının tümünün çözümsüz problemler olduğu

kanıtlanmıştır. Daha sonra Papadimitriou ve meslektaşları, 2005'ten 2008'e kadar olan dönemde sadece Nash dengesini bulmanın da çözümsüz olduğunu kanıtlamışlardır. Taş-kâğıt-makas gibi basit oyunların bir bakışta görünen denge noktaları olabilir fakat gerçek dünyanın karmaşıklığındaki oyunlarda katılımcıların oyunun denge noktasını bulacağından ya da bu noktaya ulaşacaklarından kesin olarak emin olamayız. Bu da karşılığında oyunu tasarlayanların oyuncuların nasıl davranacaklarını önceden tahmin etmek için denge noktasını kullanmak zorunda olmadıkları anlamına gelir. Bu durumu iyice anlamının sonuçları oldukça güçlüdür. Nash dengesini ekonomi teorisinde pazar davranışlarını modellemek ve tahmin etmek için bir yöntem olarak boş bir alanı doldurmuştur ama bu yeri hak etmemiş de olabilir. Papadimitriou "Eğer bir denge noktası fikri verimli bir şekilde hesaplanabilir değilse, rasyonel tarafların davranışlarının tahmini olarak güvenilirliği kaybolur" demektedir. MIT'den Scott Aaronson da bu fikre katılmaktadır. "Bana göre eğer Nash'in denge noktası teoreminin varlığı diyelim ki serbest pazarın hükümet müdahalelerine karşı olan tartışmalarıyla ilgili olarak değerlendiriliyorsa, bu denge noktalarını bulma teoremi de [çözümsüz] ilgili olarak kabul edilmelidir." Oyuncuların Nash denge noktalarının tahmine yönelik yetenekleri sadece bu denge noktaları diğer oyuncular tarafından gerçekten bulunabilirse bir önem arz eder. eBay'in eski araştırma müdürü Kamal Jain şöyle demektedir: "Eğer dizüstü bilgisayarınız bunu bulamıyorsa, pazar da bulamaz."

İyisiyle Kötüsüyle Baskın (Dominant) Stratejiler

Bir denge noktasına ulaşırsak bile, sırf istikrarlı ve tutarlı olması onu *iyi* yapmaz. Çelişkili görünebilir ama hiçbir tarafın stratejisini değiştirmek istemediği denge noktası stratejisi, oyuncular için en iyi sonuçlara giden yol olmak zorunda değildir. Bu durum,

oyun teorisinin en ünlü, en çekici ve tartışmalı iki kişilik oyunundan daha iyi hiçbir yerde görülemez: “Tutsak ikilemi (Prisoner’s dilemma).”

Tutsak ikilemi şu şekildedir: Suç ortağınızla birlikte bir banka soygunundan sonra yakalandığınızı ve ayrı hücrelerde tutulduğunuzu hayal edin. Şimdi, sessiz kalıp hiçbir şeyi kabul etmeyerek ortağınızla “iş birliği” yapmak ile onu polise satarak ortaklığınızdan “ayrılmak” arasında karar vermelisiniz. Eğer her ikiniz de aranızda iş birliği yapar ve sessiz kalırsanız polislerin ellerinde herhangi birinizi mahkum edecek kadar yeterli delil olmadığını ve bu nedenle de serbest kalacağınızı ve diyelim ki 1 milyon doların yarısını -500.000 doları- alabileceğinizi biliyorsunuz. Eğer bir kişi ortaklıktan ayrılır ve polisle iş birliği yapar ve bu sırada diğeri susarsa, iş birliği yapan serbest kalır ve bir milyon doların tamamını alırken diğeri de suçun tek faili olarak 10 yıla mahkum edilir. Eğer her ikiniz de polisle iş birliği yaparsanız suçlu bölüşür ve cezayı bölüşürsünüz: Her ikinize de beş yıl.

Buradaki sorun şudur. Karşı taraf her ne yaparsa yapsın sizin için ortaklıktan ayrılmak her zaman en kârlısıdır. Eğer ortağınız sizi satarsa, sizin de onu satmanız size hayatınızın beş yılını geri kazandıracaktır. Tüm cezayı (10 yıl) tek başına çekmektense paylaşılan cezayı alırsınız (beşer yıl). Ve eğer ortağınız sessiz kalmışsa onu ele vermek size bir milyon doların tamamını verecektir. Paylaşmak zorunda kalmayacaksınız. Ortağınızın yapacağı ne olursa olsun, sessiz kalıp ortağınızla iş birliği yapmaktansa her zaman ortaklıktan ayrılıp konuşmak daha iyidir. Aksini yapmak sizin için her zaman daha kötü şekilde sonuçlanacaktır.

Aslında bu durum ortaklıktan ayrılma stratejisini sadece denge stratejisi değil, aynı zamanda *baskın* strateji yapmaktadır. Baskın bir strateji, karşınızdakinin tüm muhtemel stratejilerine karşılık olarak en iyi cevap olarak yinelemelerden tamamen ka-

çınır. Bu nedenle onların ne düşündüğünü anlamak için kendinizi zahmete sokmanıza bile gerek kalmaz. Baskın bir strateji, güçlü bir şeydir.

Şimdi ikilemin olduğu noktaya geri dönelim. Eğer herkes mantıklı olanı yapar ve baskın stratejiyi izlerse, hikâye her ikiniz için de kötü bir şekilde son bulur. Beş yıl yatarsınız. Bu da özgürlük ve yarım milyon dolarla karşılaştırıldığında, suça dâhil olan herkes için dramatik bir şekilde daha kötüdür. Peki, bu nasıl oldu?

Bu durum, geleneksel oyun teorisinin önemli düşüncelerinden biri olarak ortaya çıkmıştır. Hepsi kendi çıkarına rasyonel bir şekilde hareket eden bir dizi oyuncu için denge noktası, bu oyuncular için gerçekte en iyi olan sonuç olmayabilir.

Bilgisayar biliminin prensiplerine sadık algoritmik oyun teorisi bu bakış açısını ele almış ve “anarşinin bedeli (the price of anarchy)” denilen bir ölçü yaratarak bunu nicel hâle getirmiştir. Anarşinin bedeli iş birliği (merkezi olarak tasarlanan ve koordine edilen çözüm) ile rekabet (her bir katılımcının birbirlerinden bağımsız olarak kendileri için sonuçları maksimize etmeye çalıştığı) arasındaki farkı ölçer. Tutsak ikilemi gibi bir oyunda bu bedel aslında sonsuzdur. Bu oyunun muhtemel sonuçları (riskte olan nakit para miktarını artırmak ve hapis cezalarını uzatmak) arasındaki farkı, baskın strateji aynı kalsa da daha genişletebilir. Oyuncular koordine etmezse işlerin onlar için ne kadar acı verebileceğinin bir sınırı yoktur. Fakat algoritmik oyun teorisyenlerinin daha sonra bulacakları başka oyunlarda anarşinin bedeli o kadar da kötü değildir.

Örneğin trafiği ele alalım. İster işine her gün tampon tampona trafikte gitmeye çalışan bireyler isterseniz de TCP paketlerini internette yönlendiren yönlendiriciler olsun sistemdeki herkes, sadece kendileri açısından en kolay olan şeyi ister. Sürücüler ne olursa olsun sadece en kısa güzergâhı ister ve yönlendiriciler

sadece minimum eforla paketleri göndermek ister ama her iki durumda da bu istekler ana yolların aşırı kalabalık olmasıyla ve herkese zarar veren tıkanıklıkların yaşanmasıyla sonuçlanabilir. Peki, ne kadarlık bir zarardan bahsediyoruz? Tim Roughgarden ve Cornell'den Eva Tardos 2002 senesinde “bencil yönlendirme (selfish routing)” yaklaşımının sadece 4/3 değerinde bir anarşi bedeli olduğunu kanıtlamışlardır. Yani herkesin istediğini yapması, kusursuz bir koordinasyondan sadece yüzde 33 daha kötüdür.

Roughgarden ve Tardos'un çalışmasının hem şehirlerdeki fiziksel trafiğin planlanmasında hem de ağ altyapılarında önemli uygulamaları vardır. Örneğin bencil rotalamanın düşük anarşi bedeli, internetin bireysel paketleri yönlendirmeye ilgilenen herhangi bir merkezi otorite olmadan nasıl bu kadar iyi işlediğini açıklayabilir. Eğer bu şekilde yapılabilecek bir koordinasyon mümkün olsaydı bile, çok fazla katkısı olmayacaktı.

Konu insan trafiği olduğunda anarşinin düşük olan bedeli hem iyi hem kötüdür. İyi olan, merkezi bir koordinasyonun eksikliğinin sizin işe gidişinizi sadece yüzde 33 kötüleştirmesidir. Diğer taraftan, sürücüsüz ve birbiriyle ilişkilendirilmiş otomobil ağının bize geleceğin trafik ütopyasını getireceğini sanıyorsanız bugünün bencil, koordine edilmemiş sürücülerinin çoktan opti-male oldukça yakın bir durumda olduğunu söylemek hevesinizi kaçırabilir. Sürücüsüz araçların yollardaki kazaları azaltması gerektiği ve hep birlikte birbirlerine daha yakın seyahat edebilecekleri doğrudur ve bunlar trafiği hızlandıracaktır. Lakin duruma tıkanıklık açısından baktığınızda anarşi oranının kusursuza nazaran sadece 4/3 oranında tıkanıklık olması, kusursuz şekilde koordine edilmiş işe gidişlerin şimdikilerin sadece 3/4'ü kadar sıkışık olacağı anlamına gelir. Durum birazcık James Branch Cabell'in meşhur sözü gibidir: “İyimser mümkün olan en iyi ortamda yaşadığımızı söyler ve kötümser de bunun gerçek olmasından kor-

kar.” Trafik sıkışıklığı her zaman için ister bilgisayar ister insan ister bencil ister iş birlikçi olsun sürücülerin bireysel kararlarından çok planlayıcılar ve genel talep tarafından çözülebilir bir problem olacaktır.

Anarşinin bedelini sayısal hâle getirmek, bu alana ademi merkezi sistemlerin artılarını ve eksilerini değerlendirmek için insanların kendilerini oyun teorisi oyunlarında oynarken buldukları (bilerek ya da bilmeyerek) alanlarda geniş uygulamaları olan somut ve titiz bir yol sunmuştur. Düşük bir anarşinin olması, sistemin kendi başına, iyi ve kötü günde çok dikkatli ve iyi bir şekilde yönetildiğinde olabileceği kadar iyi olması anlamına gelir. Diğer taraftan yüksek bir anarşinin olması, dikkatli bir şekilde koordine edilirse işlerin iyi gitme potansiyeli olduğu ama dışarıdan müdahale olmazsa felaketle dans ettiğimiz anlamına gelir. Tutsak ikilemi kesinlikle ikinci türden bir durumdur. Ne yazık ki dünyanın oynaması gereken en önemli oyunların birçoğu da öyledir.

Otlakların (Ortak Kaynakların) Trajedisi

Çevre bilimci Garret Hardin 1968’de iki kişilik tutsak ikilemi problemini aldı ve bunu tarımla uğraşan bir köyün tüm bireylerini kapsayacak şekilde ölçeklendirmeyi düşündü. Hardin okuyucularını herkesin sürülerine açık ama sınırlı bir kapasitesi olan “ortak” kamu otlaklarını düşünmeye çağırdı. Tüm köylüler teorik olarak diğerlerini düşünecek şekilde (herkese biraz ot kalacak şekilde) hayvanlarını otlatmalıydı. Fakat uygulamada daha fazla otlatmanın faydası doğrudan size gelmektedir ve bunun zarar bakımından sonucu çok çok az gibi görünmektedir. Eğer herkes otlatması gerekenden fazlasını kullanmak olan bu mantığı kullanırsa o zaman korkunç bir denge noktası oluşmaktadır: Tamamen tüketilmiş bir otlak ve ondan sonra *kimsenin* hayvanı için ot kalmaması durumu.

Hardin bu duruma “Otlakların (Ortak Kaynakların) Trajedisi” adını verdi ve bu olgu ekonomistlerin, siyasi bilimcilerin ve çevre hareketlerinin kirlilik ve iklim değişikliği gibi büyük ölçekli ekolojik krizlere baktıkları bir nevi öncelikli mercek oldu. Carnegie Mellon’dan bilgisayar mühendisi ve oyun teorisyeni Avrim Blum şöyle demektedir: “Ben çocukken kurşunlu benzin diye bir şey vardı. Kurşunlu olan 10 sent kadar daha ucuzdu ama çevreyi kirletiyordu... Zaten herkes bunu kullanıyor diye düşünerek arabanıza kurşunlu benzin koysanız kişisel olarak siz aslında ne kadar kötü olabilirdiniz ki? O kadar da değil, değil mi? Bu tutsak ikilemidir.” Aynı şey şirketler ve uluslar seviyesinde de geçerlidir. Yakın zamanda bir gazete başlığı, sıkıntıyı kısa ve öz bir şekilde dile getirdi: “İstikrarlı bir iklim, birçok fosil yakıtın toprağın altında kalmasını gerektirir ama kimin topraklarının altında?” Bir şirketin (ve bir dereceye kadar da bir ulusun) rekabetçi avantaj uğruna rakiplerinden biraz daha umursamaz olması kendileri açısından daha iyidir. Ancak eğer *hepsi* daha umursamaz bir şekilde hareket ederlerse bu harap olmuş bir dünyaya neden olur ki bu, bir hiç uğruna olur: Başladıkları noktaya kıyasla kimse için ekonomik bir avantaj yoktur.

Bu tür bir oyunun mantığı o kadar yaygındır ki onun etrafa saldırdığını görmek için kusurları aramak zorunda bile değiliz. Tertemiz bir vicdanla, çok kötü bir denge noktasına ulaşabiliriz. Nasıl mı? Şirketinizin politikasından daha uzak yerde bunu aramanıza gerek yok. Amerika’da insanlar, dünyadaki en uzun çalışma saatlerinden birine sahiptir. Bir ekonomist bunu “dünyada çalışmanın değerinin daha fazla, boş zamanın değerinin daha az olduğu başka yer yoktur” şeklinde ifade etmiştir. İş verenlerin çalışanlarına iş harici zaman tanımları konusunu düzenleyen birkaç kanun vardır ve Amerikalı çalışanlar tatili olsa bile bunu kullanmamaktadırlar. Yakın zamanlardaki bir çalışma, ortalama bir çalışanın kendisine tanınan izin günlerinin sadece yarısını

kullandığını ve şaşırtıcı şekilde yüzde 15'inin de hiç izin kullanmadığını göstermiştir.

Şimdilerde Körfez Bölgesi (Bay Area) izin politikalarında radikal bir paradigma değişikliğine giderek bu üzücü durumu tersine çevirmeye çalışmakta: Oldukça iyi niyetli ve tamamen kötü bir kadere sahip bir değişiklik. Düşünce kulağa yeteri kadar masum gelmekteydi. Her bir çalışan için sabit ve zorunlu bir rakam belirlemek ve daha sonra kimsenin bu sınırı aşmadığından emin olmak için insan kaynaklarını tüketmek yerine neden sadece çalışanları serbest bırakmıyoruz ki? Neden sadece sınırsız tatil hakkı vermiyoruz ki? Bu konudaki olaylara ait raporlar karışıktır ama oyun teorisi bakış açısıyla incelendiğinde bu yaklaşım tam bir kâbustur. Tüm çalışanlar teorik olarak mümkün olduğu kadar fazla tatil yapmak isteyecektir. Aynı zamanda daha sadık, daha bağlı ve daha işine düşkün (ve böylece terfi etmeye daha uygun) görünmek için diğerlerinden daha az tatil isteyeceklerdir. Herkes bir taban değeri için diğerlerine bakacak ve bu sürenin biraz altında izin isteyecektir. Bu oyundaki Nash denge noktası *sıfırdır*. Yazılım şirketi Travis CI'nın CEO'su Mathias Meyer “İnsanlar en fazla tatil yapan olmamak için izin alırken tereddüt edecektir. Bu, en aşağıya doğru bir yarıştır” demektedir.

Bu durum, tam olarak bir otlakların (ortak kaynakların) trajedisi durumudur. Ve şirketler arasında ve şirketlerin içinde de en az o kadar kötüdür. Küçük bir kasabadaki iki dükkân sahibini gözünüzün önüne getirin. Her biri haftada yedi gün açık kalmayı ya da Pazar günlerini dinlenmek ve arkadaşlarıyla vakit geçirmek için tatil olarak kullanarak altı gün açık kalmayı seçebilirler. Eğer her ikisi de bir gün tatil kullanırsa mevcut pazar paylarını muhafaza edecek ve çok daha az sıkıntıya gireceklerdir. Fakat eğer dükkân sahiplerinden biri dükkânını haftada yedi gün açmaya karar verirse ekstra müşteri çekecektir. Onları rakibinden ça-

lacak ve zarar etmesine neden olacaktır. Burada da Nash dengesi herkesin sürekli olarak çalıştığı noktadır.

Bu sorun 2014 tatil döneminde ABD’de önemli bir olaya neden oldu ve pazar paylarının rakiplerine kaymasını istemeyen perakendeciler arasında berbat bir denge durumuna neden oldu. *International Business Times* dergisi bunu “Dükkânlar daha önce hiç açılmadıkları kadar erken açılmakta” olarak bildirdi. Macy’s, mağazalarını (Target mağazalarının yaptığı gibi) bir önceki sene-ye nazaran iki saat erken açma kararı aldı. Kmart ise Şükran Gü-nü sabahı 06.00’da açma kararı aldı ve 42 saat boyunca açık kal-dı.

Peki biz, oyuncular olarak kendimizi bunun gibi bir durumda (iki taraflı bir tutsak ikilemi gibi) bulduğumuzda ne yapabiliriz? Bir bakıma hiçbir şey. Bu kötü denge durumlarının sahip olduğu o istikrarlı durum yani, onları dengede kılan şey, lanet bir şeye dönüşür. Genellikle baskın stratejileri içeriden değiştiremeyiz. Fakat bu, kötü bir denge durumunun düzeltilemeyeceği anlamına gelmez. Sadece çözümün başka bir yerden geleceği anlamına gelir.

Mekanizma Tasarımı: Oyunu Değiştirin

Oyuncudan nefret etmeyin, oyundan nefret edin.

—ICE-T

*Bir daha asla aileden birinin karşısında taraf olmayın,
asla.*

—Baba filminden

Tutsak ikilemi insanların iş birliği konusunda nesillerdir tartışma ve çatışma konusu olmuştur. Londra Üniversitesi oyun teorisyenlerinden Ken Binmore bu tartışmaların en azından bir kısmını yanlış bir yönlendirme olarak görmektedir. Ona göre, “Tutsak

ikileminin insanların iş birliği konusundaki her şeyi içerdiğini düşünmek tamamen yanlıştır. Aksine oyun, iş birliği olmaması üzerine kurulmuş gibidir.”*

Eğer oyunun kuralları kötü bir stratejiyi zorluyorsa belki de stratejileri değiştirmemeliyiz. Oyunu değiştirmeliyiz.

Bu durum bizi oyun teorisinin “mekanizma tasarımı (mechanism design)” olarak bilinen bir türüne getirmektedir. Oyun teorisi belirli bir kural seti ışığında hangi davranışın sergileneneğini ararken mekanizma tasarımı (bazen ters oyun teorisi de denir) diğer yönde işlemektedir. Görmek istediğimiz davranış bize hangi kurallar verir? Oyun teorisinin ortaya çıkardıkları -bir denge noktasını oluşturan stratejilerin tüm oyuncular için mantıklı fakat kötü olabileceği gibi- mantığa aykırı olabildiği gibi mekanizma tasarımınıninkiler daha da kötü olabilir.

Şimdi sizi ve soygundaki ortağınızı, bir kez daha tutsak ikilemi oynamak için hücrenize geri koyalım ama bu sefer önemli bir değişiklik yapalım: Baba (the Godfather) filmi. Şimdi siz ve suç ortağınız bir suç örgütünün üyesisiniz ve örgütün başı içinizden çıkabilecek bir muhbirin ölümle cezalandırılacağını açıkça belirtmiştir. Oyunun sonuçlarındaki bu değişiklik, hareket tarzlarınızın sınırlanması ve bununla birlikte hem siz hem de ortağınız için işlerin iyi bir şekilde sonuçlanma olasılığını artırma etkisine sahiptir. İhanet artık daha az çekici olduğu için her iki mahkum da iş birliği yapmaya meyillidir ve her ikisi de yarım milyon dolarla çekip gidecektir. Elbette ki Baba’ya verilecek pay bu rakamdan düşülecektir.

Buradaki mantığa aykırı ve güçlü olan şey, her bir sonucu daha da kötüleştirebileceğimiz (bir yanda ölüm diğer tarafta ver-

* Binmore bir görüş daha belirtmektedir: Tutsak ikilemi gibi oyunlar İmanuel Kant’ın rasyonelliğin “kategorik zorunluluğu” dediği ve herkesin istediği gibi hareket etmesi fikrini ortadan kaldırmaktadır. Bu görüş tutsak ikilemi denge noktasına nazaran daha iyi bir sonuç ortaya çıkarmaktadır fakat bunun istikrarlı ve sürekli olmaması durumunu da ortadan kaldırmaz.

giler) ancak dengeyi değiştirerek herkesin yaşamını daha iyi yapabileceğimizeyizdir.

Küçük bir kasabadaki dükkân sahipleri için Pazar günleri dükkânların kapalı olacağına dair sözlü bir anlaşma istikrarsız olacaktır. Bir dükkân sahibi paraya ihtiyacı olur olmaz bu sözü bozma eğiliminde olacaktır ve bu da diğerlerinin pazar paylarını kaybetmemek için bu kuralı ihlal etmelerine neden olacaktır. Bu uygulama, tüm dükkân sahiplerini en kötü senaryo olan o kötü denge noktasına geri götürecektir. Yorgunluktan tükenirler ve bu çabalarının karşılığı olarak rekabet açısından herhangi bir avantaj elde etmezler. Lakin Pazar günleri dükkân açmamaya dair sanki bir mafya liderinden emir almışlar gibi yazılı bir anlaşma yaparak Pazar günleri bir dükkân tarafından kazanılan paranın diğer dükkânlara pay edilmesini sağlayabilirler. Tatmin edici olmayan denge noktasını kötüleştirerek daha iyi ve yeni bir denge durumu yaratırlar.

Diğer taraftan oyunun sonuçlarındaki denge noktasını değiştirmeyen bir değişiklik genellikle istenenden daha az etkiye sahip olur. Yazılım şirketi Evernote'un CEO'su Phil Libin Evernote çalışanlarına tatil yapmaları durumunda 1.000 dolar nakit önererek haberlerin başlıklarında kendisine yer bulmuştu. Fakat bu ifade oyun teorisi açısından bakıldığında biraz yanıltıcıydı. Örneğin tutsak ikileminde masada beklemekte olan para miktarını artırmak şu noktanın gözden kaçmasına neden olur: Bu değişiklik kötü denge durumunda bir değişiklik yaratmaz. Bir milyon dolar ile 10 milyon doların etkisi mahkûmlar üzerinde aynıdır. Sorun tatillerin çekici olmaması değildir. Sorun, herkesin kendi denklemlerine nazaran daha az izin kullanma eğiliminde olmasıdır ve bu da denge noktası hiç izin kullanmamak olan bir oyun yaratmaktadır. 1.000 dolar tabi ki olayı biraz daha tatlandırmaktadır ama oyunun prensibini değiştirmez. Bu da yandaki kişiden

daha sadık görünecek kadar izin almak, böylece binlerce dolar değerinde terfi ya da maaş artışı almaktır.

Peki, bunun anlamı Libin'in her bir çalışanına izin kullanmaları için o binlerce dolar önermesi midir? Hayır. Mekanizma tasarımı bize Libin'in havuçtan ziyade sopayı göstererek istediğini elde edebileceğini söylemektedir: Tek kuruş harcamadan daha iyi bir denge noktasına erişebilir. Örneğin, küçük bir tatil süresini zorunlu yapabilir. Yarışı değiştiremezse bile en azından tabanını değiştirebilir. Mekanizma tasarımı bir tasarımcı için güçlü bir argüman sunar: İster CEO olsun isterse de bir mafya lideri.

Bir spor liginin düzenleyicisi de bu türden tasarımcıdır. NBA'deki takımlar Pazar günü sabaha karşı saat 03.00'te ya da Noel günü öğleden sonra veya buna benzer aklınıza gelen saçma zamanlarda karşılaşsalar ne kadar acınası ve kötü bir durum olurdu bir düşünün. Göreceğiniz şey aşırı derecede uykusuzluktan muzdarip ceset gibi oyuncuların akıllarını kaybedecek dereceye kadar kimyasal ilaçlarla kendilerini ayakta tutmaya çalışmaları olacaktır. Savaşlar da bunun gibidir. Oysa ki "asla uymayan şehirde" mikro saniyeler içerisinde yatırımcıların çok ciddi miktarlarda satışlar gerçekleştirdiği Wall Street bile her gün saat tam 16.00'da tam bir ateş kes durumuna geçer ve bu şekilde borsa simsarları, uykunun hiç yer almadığı bir denge noktasına doğru sürüklenmek yerine her gece belirli saatlerde yataklarına gidebilmektedir. Bu bakımdan, borsa bir savaştan ziyade daha çok bir spor gibidir.

Bu mantığı başka yerlere de uygulamak, hükümetin rolü üzerine muhtemel bir tartışmayla sonuçlanır. Aslında pek çok hükümetin kullanılacak minimum izin ve dükkânların çalışma saatlerine ilişkin kanunları vardır. Ve ABD ücretli izne ilişkin federal gereksinimleri olmayan tek gelişmiş ülke olsa da Massachusetts, Maine ve Rhode Island'ın Şükran Günü'nde ticaret yapılmasını engelleyen eyalet seviyesinde yasaklamaları mevcuttur.

Bunlar gibi kanunlar genellikle sömürge çağından kalmıştır ve başlangıçta doğaları gereği dini özellikleri vardır. Aslında dinin kendisi bu şekildeki oyunların yapısını düzenlemenin doğrudan bir yolunu sunmaktadır. “Şabat Gününü Hatırla” gibi dini kurallar, ister yüce bir varlık tarafından isterse de bir grup inanan tarafından getirilmiş olsun, dükkân sahiplerinin karşılaştığı problemi düzgün bir şekilde çözmektedir. Ayrıca diğer türden olan anti sosyal davranışlara (cinayet, zina ya da hırsızlık gibi) ilahi bir güçle müdahale etmek de sosyal bir çevrede yaşamadaki oyun teorisine ait sorunları çözmenin bir yoludur. Bu açıdan bakıldığında Tanrı hükümet işlerinde daha iyidir çünkü her şeyi bilme, her şeye gücü yetme ve kötü eylem kararları almanın ciddi sonuçları olması konusunda garanti sağlar. Sonuçta Tanrı’nın kendisi gibi bir Mafya Babası yoktur.

Din bilgisayar bilimcilerinin nadiren konuştukları konulardan biridir. Aslında *Things a Computer Scientist Rarely Talks About* (Bir Bilgisayar Mühendisinin Nadiren Konuştuğu Şeyler) isimli kitabın konusu tam olarak budur. Fakat insanların seçeneklerinin sayısını azaltarak din tarafından uygulanmakta olanlara benzer davranış sınırlamaları bu kararları, hesaplama açısından sadece daha az zorlu hâle getirmemekte, aynı zamanda daha iyi sonuçlara neden olmaktadır.

Evrım Tarafından Mekanizma Tasarımı

Bir kişi ne kadar bencil olarak düşünülürse düşünülsün, doğasında başkalarının iyiliğini göz önüne alan ve onların mutluluğunu isteyen, bunu da onları mutlu görme keyfi dışında kendisinin bir çıkarı olmadan yapan bazı prensipler mevcuttur.

—Adam SMITH, The Theory of Moral Sentiments

Kalbin kendine has, aklın bile bilgisinin olmadığı bir mantığı vardır.

—Blaise PASCAL

California'daki Kızıl Ormanlar, gezegendeki yaşayan şeyler içindeki en muhteşem ve en yaşlı şeylerden biridir. Bir oyun teorisi bakış açısından incelendiğinde bunlar ancak bir trajedidir. Bu kadar uzun olmalarının nedeni birbirlerinden daha iyi olmaya çalışmalarıdır: Aşırı derecede uzamalarının zararlarının diğer zararlardan artık daha fazla olduğu noktaya kadar. Richard Dawkins bunu şu şekilde açıklamaktadır:

Üst bitki örtüsü ve ağaçların üst kısmı, tıpkı havadaki bir çayır gibi işlev görmektedir: Havada asılı bir çayır. Bu örtü hemen hemen yerdeki bir otlak ölçüsünde güneş enerjisini toplamaktadır. Bu enerjinin önemli kısmı, bu kısımları havada tutmaktan başka hemen hemen hiçbir işe yaramayan dalları beslerken boşa harcanmaktadır. Havada tutulan bu otlak benzeri örtü eğer yerde olsaydı da aynı işi çok daha az bir maliyetle yerine getirebilirdi.

Eğer bu ormanlar bir tür barış üzerinde anlaşabilselerdi, ekosistem güneş enerjisinden daha fazla faydalanabilirdi. Fakat daha önceden de görmüş olduğumuz gibi bu senaryolardaki iyi sonuçlar sadece oyun dışında bir otoritenin varlığı durumunda ortaya çıkma eğilimindedir: Getirileri en üstten en alta kadar değiştiren bir otorite. O zaman doğada olduğu gibi bireyler arasında iyi bir denge sağlamanın başka güzel bir yolu yoktur.

Diğer taraftan eğer iş birliği gerçekten bazı oyunlarda daha iyi sonuçlara neden oluyorsa, iş birliği mantığına sahip türlerin evrimsel olarak yaygınlaşacağını bekleyebiliriz. Fakat o zaman da şunu sorabiliriz: Bireysel değil de sadece grup seviyesinde

rasyonel olursa, iş birliği nereden gelecektir? Belki de bireylerin tamamen kontrol edemeyeceği bir şeyden gelmek zorundadır. Örneğin *duygular*.

Birbirinden bağımsız gibi görünen şu iki senaryoya bakın: (1) Bir erkek elektrikli süpürge alır, cihaz bir iki hafta içerisinde bozulur ve adam internet üzerinde bir eleştiri bırakmak için on dakikasını harcar. (2) Bir tatil beldesindeki markette alışveriş yapan bir kadın, bir hırsızın yaşlı bir adamın cüzdan ve anahtarlarını çaldığını fark eder ve onunla mücadele ederek cüzdanı kurtarır.

Bu senaryolardan ikincisi her ne kadar kahramanca, birinci de biraz sinirli bir hareketmiş gibi görünse de her ikisinin de ortak yanı -farklı yöntemlerle icra edilmiş olsalar da- gönüllü bir şekilde kendilerini düşünmemiş olmalarıdır. Mutsuz tüketici süpürgesinin değiştirilmesi ya da parasını geri almanın peşinde değildir. Eleştiri ve görüşlerini yazmış olmanın verdiği çok az tatmin dışında pek de bir şey eline geçmeyecektir. Dükkândaki kahraman kadın da kendisini çok büyük bir riske atmıştır. Belki de kendisinin hiç tanımadığı bir adama ait 40 dolar için yaralanabilir, hatta ölebilirdi. Sadece yardım etmek isteseydi, kendisini bir hastanenin acil servisinde görme tehlikesine girmeden cüzdanından iki tane 20 dolarlık banknot çıkarıp adama verebilirdi! Bu bakımdan her iki kişi de rasyonel bir şekilde hareket etmemektedir. Diğer taraftan hareketleri toplumlarının yararındadır. Hepimiz yankesiciliğin yapanların yanına kâr kalmadığı ve kalitesiz ürün satan şirketlerin hak ettikleri kötü şöhrete sahip oldukları bir dünyada yaşamak isteriz.

Belki de her birimiz, bireysel olarak kendi çıkarına hareket edebilen kişilikler içimizde olmadan daha iyi olabiliriz. Böylesine standart davranışların yerleşik oldukları bir toplulukta yaşamak her zaman daha iyidir.

Peki, o zaman dış otoritenin olmadığı bu ortamlarda bu iki

kişiyi harekete geçiren şey neydi? Bu kişileri bencil denge noktasını bozmaya iten şey neydi? İlk olarak öfkeyi söyleyebiliriz. İster kötü bir alışverişle ateşlenmiş olsun isterse de bir hırsız tarafından öfke, mantığın önüne geçebilir. Ve bu gibi durumlarda evrimsel yaklaşım sanki dış bir otoriteymiş gibi iş görür.

Doğa, başka türlerin amaçları uğruna kullanılan bireylerin örnekleriyle doludur. Örneğin *Dicrocoelium Dendriticum*, karıncaların bilinçli bir şekilde otların uçlarına kadar tırmanmasına ve bu şekilde en sevdiği ev sahibi olan koyunlar tarafından otlarla birlikte yenmesine neden olan bir parazittir. *Toxoplasma Gondii* paraziti de benzer bir amaçla farelerin kedi korkularından kalıcı olarak kurtulmalarına neden olur.

Kötü bir süpürge almış ve misilleme peşindeki tüketici ve marketteki kahraman kadın için duygu benzer şekilde bir anlığına kendi türümüzün kontrolü ele almasıdır. Nietzsche “Ahlak, bireydeki sürü psikolojisidir” diye yazmıştı. Kısaca açıklamak gerekirse duygu, türler içerisindeki mekanizma tasarımıdır. Duygular gönüllülük esasına dayanmadığı için dışarıdan herhangi bir zorlama gerektirmeyen anlaşmaları mümkün kılar. İntikam neredeyse hiçbir zaman intikam peşinde olan kişinin yararına bir sonuç ortaya koymaz ve akıllıca bir hareket sergilemeyen kişi de muhtemelen buna karşılık uygun bir sonuç elde edecektir. Cornell’den ekonomist Robert Frank’in de belirttiği gibi, “Eğer insanlar mallarımızı çalan bir kişiye karşı mantıklı olmayan bir şekilde karşılık vermemizi beklerlerse, bunu nadiren yapacağız çünkü çalmak onların yararına olmayacaktır. Sadece materyalist bir şekilde kendi çıkarımıza hareket etmeyle güdülenmektense diğeri daha iyi bir şekilde işe yaramaktadır.”

(Eğer medeni kişilerin misilleme yerine yasal anlaşmaları ve kanunları olduğunu düşünüyorsanız, bu yolların daha uzun ve meşakkatli olduğunu hatırlayın. Gelişmiş toplumlarda mahkeme-

ler misilleme için yapılan lakin kendine daha fazla zararı olan yollardır.)

Öfke için geçerli olanlar, tutku, suçluluk ve sevgi için de geçerlidir.

Kulağa garip gelse de tutsak ikileminin evlilik hakkında bize anlatacağı şeyler vardır. Sekreter problemi gibi optimal duraklama problemlerinden kitabın 1'inci bölümünde bahsederken hem karşı cinsten biriyle çıkma hem de apartman dairesi arama eylemlerinde henüz görülmemiş olan gelecekteki seçeneklere ilişkin kararlar alınmaktadır. Hem aşk hem de ev arayışında optimal duraklama kararımızı verdikten sonra bile daha fazla seçenekle karşılaşmaya devam ederiz. O zaman neden bir değişim yapmak için hazır olmayalım? Elbette diğer tarafın (ister eş olsun ister ev sahibi) değişim için hazır olması durumu da uzun vadeli bir birlikteliği engelleyebilir ve işte bu durum kararın değerini ortaya koyar.

Her iki durumda da bağıllık problemi denilen bu problem en azından kısmen bir anlaşmayla halledilebilir. Ama oyun teorisi flört etmede, isteyerek yapılan ve kanuna dayanan bağların bir ilişkiyi sürdürmek açısından istemsizce gelen sevgiden daha az etkili olduğunu ileri sürer. Robert Frank “İnsanların ilişkilerini ileride mantıklı olmayabileceği nedeniyle bırakacakları endişesi, genellikle kendilerini bu ilişkiye bağlayan ilk şey akılları değilse ortadan kalkmaktadır” demekte ve görüşlerini şu şekilde açıklamaktadır:

Evet, insanlar önem verdikleri nesnel özellikleri ararlar. Herkes nazik ve zeki ve sağlıklı ve ilginç ve belki de fiziksel olarak çekici ve geliri iyi bir kişi ister ama bu ilk sınavdır... Birlikte yeteri kadar zaman geçirdikten sonra birlikte yaşamaya devam etme nedenleriniz bunlar değildir. Artık nedeniniz o kişinin kendisidir. Sizin için o değerlidir, bu nedenle anlama

benzeri bir şeye ihtiyaç duymazsınız, hem de objektif bir şekilde daha iyi bir seçenekle karşılaştığınız bile...

Farklı bir şekilde ifade etmek istersek: Aşk organize bir suç gibidir. Evlilik oyununun yapısını öyle bir değiştirir ki denge, herkes için en iyi olan bir sonuç olarak ortaya çıkar.

Oyun yazarı George Bernard Shaw bir keresinde evlilikle ilgili olarak şöyle yazmıştı: “Eğer mahkum mutluysa, onu neden içeride kalması için kilitliyoruz? Eğer mutlu değilse, neden öyleymiş gibi yapıyor?” Oyun teorisi genellikle bu basit bilmece için ince bir cevap sunmaktadır. Mutluluk kilidin anahtarıdır.

Aşk için yine oyun teorisi tarzındaki bir yaklaşım bir başka konunun daha altını çizmektedir. Evlilik kiminle karşılıklı olarak ortaklık yapmayı seçtiğiniz bir tutsak ikilemidir. Bu size küçük bir değişiklikmiş gibi görünebilir fakat aslında oynamakta olduğunuz oyunun yapısı üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır. Eğer bir şekilde suç ortağınızın siz ortalarda olmazsanız üzüleceğini bilerseniz, hapiste çürüme konusunda daha az endişelenirsiniz.

Bu nedenle aşk için olan mantıklı argümanın iki bölümü vardır: Bağlılık duyguları sizi sadece ortağınızın niyetini düşünmekten alıkoymaz, aynı zamanda sonuçtaki ödülleri de değiştirerek tamamen daha iyi bir sonucu ortaya koyar. Dahası, âşık olmak sizi elde edilecek daha çekici bir eş yapar. Kalbinizin kırılması olasılığınız sizin güvenilir bir eş olmanızın nedenidir.

Bilgi Sağanağı: Rasyonel Köpükler

Ne zaman kendinizi çoğunluğun tarafında bulursanız, durup düşünme vakti gelmiştir.

—Mark TWAIN

Diğerlerinin davranışlarına dikkat etmenin iyi bir fikir olmasının nedeni, bunu yaparak onların dünyaya ilişkin bilgilerini kendinizinkilere ekliyor olmanızdır. Popüler bir restoran muhtemelen iyidir. Yarısi boş bir konser salonu da muhtemelen kötüye işaret eder ve eğer konuştuğunuz biri sizin göremediğiniz bir şeyi işaret ediyorsa kafanızı o tarafa çevirip bakmak muhtemelen çok da kötü bir fikir değildir.

Diğer taraftan diğer kişilerden öğrenmek her zaman akla yatkın bir eylem olmak zorunda değildir. Moda ve eğilimler, dünyadaki gerçeklere bağlı olmaksızın diğer kişilerin davranışlarını izlemekten ve takip etmekten ibarettir. Daha da kötüsü, diğer kişilerin eylemlerinin faydalı bir yol gösterici olduğunun varsayılması ekonomik felaketlere neden olan sürü psikolojisi davranışlarına neden olabilir. Eğer herkes emlak piyasasına yatırım yaparsa, ev almak mantıklı bir seçenek gibi görünür. Ne de olsa fiyatlar sadece yükselmektedir, değil mi?

2007-2009 Mortgage Krizi'ndeki ilginç bir özellik bu krizde yer alan herkesin yapmaları beklenen şeyi yaptıkları için cezalandırıldıklarını düşünmeleri idi. Ev almanın asla kaybettirmeyecek bir yatırım olduğunu düşünerek ve etraflarındaki herkesin fiyat artışına rağmen ev aldığını görerek büyümüş olan bir Amerikan nesli, bu fiyatlar dalgalanmaya ve düşmeye başladığında kötü bir şekilde etkilendi. Bu sırada bankacılar her zaman yapmış oldukları şeyden (müşterilerinin kabul ya da reddedebileceği fırsat sunmak) dolayı adil olmayan bir şekilde suçlandıklarını hissetmekteydiler. Garip bir pazar çöküşünün hemen ardından yapılan şey, suç atmaktır. Oyun teorisi bu noktada aydınlatıcı bir bakış açısı sunar: Bunun gibi felaketler kimsenin bir suçu olmasa da gerçekleşebilir.

Finansal balonların mekaniklerini uygun bir şekilde anlamak açık artırmaları anlamak ile başlar. Sotheby's ve Christie's ya da Beanie Babies'deki sekiz milyon dolarlık tabloların satılması,

ekonominin uzak köşelerinden gibi görünse de aslında ekonominin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Örneğin; Google'ın gelirinin yüzde 90'ından fazlası reklam satışlarından gelmektedir ve bu reklamlar tamamen açık artırmalarla satılmaktadır. Bu sırada hükümetler, iletişim için sunulan farklı frekans bantlarını (cep telefonu iletişim frekansları gibi) kiralayarak hizmete sunarlar ve gelir olarak on milyarlar kazanırlar. Aslında evlerden kitaplara kadar pek çok küresel pazar, çeşitli artırma türleri aracılığıyla iş görmektedir.

En basit artırma formatlarından birinde her katılımcı teklifini diğerlerinden gizli bir şekilde bir kâğıda yazar ve en yüksek teklife sahip kişi yazmış olduğu fiyat karşılığında artırmayı kazanmış olur. Bu “kapalı zarfla fiyat verme” olarak bilinir ve algoritmik bir oyun teorisi bakış açısından bununla ilgili büyük bir sorun vardır, aslında birkaç tane. İlk olarak, bu artırmayı kazanan kişi her zaman fazla ödeme yapar: Eğer bir nesneye 25 dolar değer biçerseniz ve ben de aynı nesneye 10 dolar değer biçersem ve her ikimiz de bu değerlendirmelerimizi teklif edersek (25 dolar ve 10 dolar), sadece 10 doların biraz üstünde bir rakama alabileceğiniz bir şey için 25 dolar ödemiş olursunuz. Bu problem bir başkasına da neden olmaktadır: Uygun bir fiyat vermek için -aslında çok yüksek fiyat vermemek için- artırmadaki diğer oyuncuların gerçek fiyat değerlendirmelerini tahmin etmeniz ve kendinizinkini de uygun bir şekilde “gölgelendirmeniz” gerekir. Bu yeteri kadar kötü bir durum değilmiş gibi diğer oyuncular da gerçek değerlendirmelerini teklif olarak yazmayacaklardır çünkü onlar da sizin değerlendirmenize dair tahminlerine bağlı olarak kendi tekliflerini gölgelemektedirler! Bir döngüye girmiş oluruz.

Bir diğer ihale usulü olan “açık eksiltme” ya da “Hollanda usulü”, bir parçanın fiyatını bir kişi almak isteyene kadar belirli bir fiyattan aşağıya doğru parça parça azaltır. Bu isim Hollanda'da her gün yapılan Aalsmeer Çiçek Açık Eksiltmesinden al-

maktadır ama bu ihaleler ilk başta görüldüğünden çok daha yaygındır. Satamadığı malzemelerin fiyatlarını düşüren bir dükkân ve pazarın kaldırabileceği en yüksek fiyattan evlerini kiralığa çıkaran ev sahiplerinin her ikisi de bu ihale usulünün temel özelliğini taşımaktadır: Satıcı fiyat konusunda iyimser bir şekilde işe koyulmakta ve bunu bir alıcı bulana kadar düşürmektedir. Azalan fiyatlı bu ihale sizin en yüksek limitinizi ödemeye hevesli olduğunuz kapalı zarflı artırmaya benzer ve bu nedenle de karmaşık bir stratejik miktarla teklifinizi gölgelemek istersiniz. 25 dolara almak ister misiniz, yoksa biraz daha sabredip daha düşük bir fiyatı mı bekleyeceksiniz? Tasarruf ettiğiniz her dolar ihaleyi tamamen kaybetme riski taşır.

Bu artırma şeklinin tersi “İngiliz” ya da “Açık artırma” olarak bilinen, en ünlü artırma formatıdır. Bu artırma şeklinde teklif verenler sadece bir kişi kalana kadar fiyatı yükseltirler. Bu bizim istediğimize daha yakın bir şey sunmaktadır: Bu formatta eğer bir parçaya siz 25 dolar, ben ise 10 dolar değer biçiyorsam o zaman siz bu artırmayı 25 dolara kadar çıkmadan ya da stratejik karmaşıklıkların içinde kaybolmadan 10 doların biraz üstünde kazanırsınız.

Her iki ihale formatı (İngiliz ve Hollanda) da kapalı zarf usulüyle karşılaştırıldığında ekstra bir karmaşıklık seviyesi getirmektedir. Sadece teklif veren kişinin özel bilgisini içermekle kalmaz, aynı zamanda teklif verme davranışının herkese açık akışını da içermektedir. (Hollanda usulünde, bilgiyi açığa çıkaran bir teklif eksiktir.) Ve doğru şartlar altında bu özel ve herkese açık bilgilerin karışımı oldukça tehlikeli bir hâl alabilir.

Örneğin okyanusun bir bölümünde petrol arama çalışmaları için olan teklif verme sırasında teklif verenlerin kendi değer tahminleri konusunda şüphe duyduklarını düşünelim. Londra Üniversitesi’nden oyun teorisyeni Ken Binmore’un da belirttiği gibi, “Belirli bir arama sahasında gerçekte mevcut petrol miktarı her-

kes için aynıdır fakat alıcıların bu alanda ne kadar petrol olabileceğine ilişkin tahminleri onların farklı jeolojik araştırmalarına bağlıdır. Bu tarz araştırmalar sadece pahalı değil, aynı zamanda adlarının kötüye çıktığı kadar da güvenilmezdir.” Bunun gibi bir durumda, kendi özel bilginizi herkese açık diğer bilgilerle desteklemek için rakibinizin teklifine yakından bakmak doğal bir davranış gibi görünür.

Bu bilgi görüldüğü kadar iyi bilgi sağlamıyor da olabilir. Aslında diğer teklif verenlerin *inandıkları* şeyi değil, sadece *eylemlerini* öğrenmiş olursunuz. Ve onların davranışlarının sizinkine dayanıyor olması da (tıpkı sizin davranışınızın onlarınkinden etkileniyor olması gibi) tamamen mümkündür. Tıpkı “herkesin” hiçbir şey olmayacakmış gibi bir uçurumdan aşağı gidiyor olması nedeniyle herkesin atlıyor olduğunu hayal etmek kolaydır: Gerçekte herkesin şüpheleri vardır ama gruptaki diğer herkesin eylemlerine olan güven nedeniyle bu kaygılar baskılanır.

Tıpkı otlakların (ortak kaynakların) trajedisinde olduğu gibi, bu hata oyuncuların hatası olmak zorunda değildir. Ekonomist Sushil Bikhchandani, David Hirshleifer ve Ivo Welch tarafından yazılan oldukça etkili bir yazı doğru şartlar altında, kusursuz bir şekilde rasyonel ve uygun şekilde davranan bir grup ajanın sonsuz yanlış bilgilendirme sonucu hata yapabileceklerini göstermiştir. Bu durum daha sonraları “bilgi sağanağı” olarak bilinecektir.

Petrol arama haklarına ilişkin senaryoya devam edecek olursak; belirli bir alanda arama hakları için teklif verebilecek 10 şirket olduğunu varsayalım. Bunlardan birinin sahanın petrol açısından zengin olduğunu söyleyen bir jeolojik araştırması vardır. Bir diğerinin araştırması kesin bir sonuca ulaşamamıştır ve diğer sekiz şirketin ön çalışmaları da petrol açısından arazinin verimsiz olduğu yönündedir. Ancak elbette ki şirketler birbirlerine rakip olduklarından araştırma sonuçlarını birbirleriyle paylaş-

mamakta ve sadece birbirlerinin eylemlerini gözlemlemektedirler. Artırma başladığında ilk şirket (umut vadeden araştırma sonucunu elinde bulunduran) yüksek bir başlangıç teklifi yapar. Kendi belirsiz araştırma sonucunu ilk şirketin yaptığı yüksek teklif nedeniyle iyimser bir şekilde yorumlayan ikinci şirket daha da yüksek bir teklifte bulunur. Üçüncü şirketin çok iyimser olmayan bir araştırma sonucu vardır fakat bu alanın bir altın madeni gibi olduğuna işaret eden diğer iki birbirinden bağımsız teklif ışığında ellerindeki araştırmaya güvenmemeye başlarlar ve yeni ve yüksek bir teklifte bulunurlar. Yine çok da iç açıcı olmayan bir araştırma sonucuna sahip dördüncü şirket ise artık elindeki araştırmayı göz ardı etmeye daha meyillidir çünkü rakiplerinin üçünün tamamı bu sahanın iyi bir alan olduğuna inandığını düşünmektedir. Bu şekilde onlar da yüksek bir teklifte bulunurlar. Bu “fikir birliği” gerçeklikten kopmuş durumdadır. Bir bilgi sağanağı oluşmuştur.

Teklif verenlerin hiçbiri rasyonel olmayan bir şekilde hareket etmemiştir ama net sonuç felakettir. Hirshleifer bunu şu şekilde ifade etmektedir: “Bir kişi kendisinden öncekileri, elindeki bilgilerden bağımsız bir şekilde körü körüne takip etmeye karar verdiğinde çok önemli bir şey olur ve onun eylemi kendisinden sonraki tüm karar vericiler için doğru bir şekilde bilgi sağlamaz olur. Artık ortak bilgi havuzu büyümektedir. Ortak büyük bir bilgiye sahip olmanın faydası artık mevcut değildir.”

Böyle bir durum gerçekleştiğinde gerçek dünyada ne olduğunu görmek için Peter A. Lawrence’ın gelişimsel biyoloji üzerine olan *The Making of a Fly* (Bir Sineği Anlamak) isimli kitabından başka bir örneğe bakmanıza gerek yoktur. 2011 Nisan ayı itibarıyla Amazon’un üçüncü parti pazarında bu kitap 23.698.655,93 dolar fiyatına (artı 3,99 dolar kargo ücreti) satılmaktaydı. Bu kitap neden ve nasıl olur da 23 milyon doların üzerinde bir satış fiyatına ulaşmıştı? Sonuçta ortaya çıktı ki iki satıcı fiyatlarını

birbirlerinin fiyatlarının algoritmik bir kısmına göre ayarlamaktaydı: Biri kitabın fiyatını diğerinin 0,9983 katına eşit olacak şekilde modellemişken diğeri de öteki satıcının belirlediği fiyatın 1,27059 katına eşitlemişti. Bu iki satıcıdan hiçbirisi son fiyat için bir limit koymayı akıl etmemişti ve en sonunda süreç tamamen kontrolden çıkmıştı.

6 Mayıs 2010 tarihinde dakikalar içinde görünüşte rastgele olan şirketlerin S&P 500'deki değerleri hisse senedi başına 100.000 doların üstüne çıkarken, diğerlerinin ise hisse senedi başına 0,01 dolar gibi rakamlara düştüğü hisse senedi piyasasının hızlı çöküşünde benzer bir mekanizmanın iş başında olması oldukça muhtemeldir. Yaklaşık bir trilyon dolar bir anda yok olmuştu. CNBC'den Jim Cramer canlı yayında küçük dilini yutmuş bir şekilde "Bu... Bu olamaz. Bu gerçek bir fiyat değil. Sadece gidin ve Procter hissesi alın! Gidin ve Procter&Gamble hissesi alın, gidin ve sadece alın... Demek istediğim bu saçmalık, bu müthiş bir fırsat" demişti. Cramer'in inanmadığı şey kendisinde mevcut kişisel diyebileceğimiz bilgisinin açıktan gelmekte olan ve herkesin o anda bildiği şeyle çatışması durumuydu. Görünüşe göre o anda 40 doların altında değerde gözükken bir hisse senedi için 49 dolar ödemeye istekli olan dünyadaki tek kişiydi çünkü son çeyrek bilançolarını görmüştü ve bildiği şeyden de emindi.

Yatırımcıların iki büyük sınıfa ayrıldıkları söylenir: Bir şirketin altta yatan değeri olarak gördükleri şeye göre ticaret yapan "temel" yatırımcılar ve pazarın dalgalanmalarına göre ticaret yapan "teknik" yatırımcılar. Yüksek hızlı algoritmik ticaretin yükselişi bu iki strateji arasındaki dengeyi bozmuştur ve genellikle gerçek dünya değerlerine bağlı olmayan -bir kitabı on milyonlarca dolarlık bir fiyat etiketiyle işaretlemekten ve çok değerli şirket hisselerini üç kuruşa satmaktan hiçbir rahatsızlık duymayan- bilgisayarların pazarın rasyonel olmayan özelliğini daha da

kötüleştirildiğinden şikâyet edilmektedir. Fakat bu eleştiri genelde bilgisayarlara yapılsa da insanlar da aynı türden davranışlar sergilemektedir ve birçok yatırım balonu bunu doğrular. Burada hata yine oyunculardan ziyade oyunun kendisindedir.

Bilgi sağanağı sadece balonlar için değil, aynı zamanda körü körüne modayı takip edenler ve daha genel olarak sürü psikolojisi davranışı sergileyenler için de rasyonel bir teori sunar. Herhangi bir pazarın nasıl bu kadar kolay bir şekilde yükselebileceği ve çökebileceğine dair bir açıklama getirir. Çıkarılacak pek çok ders vardır. İlk olarak genelin hâkim olduğu bilginin kişilerin birey olarak sahip oldukları bilgiyi aştığı durumlarda dikkatli olun. Buna örnek olarak insanların bir şeyi neden yaptıklarına dair bildiklerinden daha fazlasını siz bilmektesiniz ya da vardığınız hükümlerin gerçeklerden ziyade ortak görüşe uymasına daha fazla dikkat etmektesiniz. Bir yol çizmek için genellikle diğer kişilere baktığınızda onlar da aynı şey için size bakıyor olabilirler. İkinci olarak unutmayın ki eylemler inançlar değildir. Bu bilgi sağanağı genellikle insanların ne *yaptıklarına* dayanarak ne *düşündüklerini* yanlış anladığımız için gerçekleşmektedir. Kendi şüphelerimizi göz ardı etmemek konusunda özellikle hassas olmalıyız ve eğer bunları göz ardı edersek de ilerleme kaydetsek bile bunları yaymak için bir yol bulmak isteyebiliriz (diğerleri zihnimizdeki tereddütü eylemlerimizden anlamasa bile). Son olarak da tutsak ikilemini göz önünde bulundurarak bazen bir oyunun karşısında bir şey yapamayacağımız kötü kuralları olabileceğini de hatırlamalıyız. Oyuna girdikten sonra yapabileceğimiz hiçbir şey olmayabilir fakat bilgi sağanağı teorisi bu şekilde bir oyunla karşılaşmamıza en başından engel olabilir.

Ve eğer her zaman doğru olduğuna inandığı şeyi -diğerleri ne kadar çılgınca olduğunu düşünürse düşünsün- yapan türden biriyseniz, cesur olun. Buradaki kötü haber ise genel olarak sürüyü izleyenlerden daha çok hata yapacaksınız. İyi haber ise farklı

davranışlarınızın sizin dışınızdakiler tarafından net bir şekilde çıkarımlarda bulunmak için dikkate alınacağıdır. Belki de sizin tüm sürüyü bir felaketten kurtaracağınız zaman gelecektir.

Bir Kişi En Kolay Kendisini Ölçer

Bilgisayar biliminin oyun teorisi üzerinde uygulanması, strateji geliştirmeye zorunlu olmanın birbirimizle rekabet ederken ödediğimiz bedelin bir kısmı (genellikle de büyük bir kısmı) olduğunu ortaya koymuştur. Ve yinelenen zorlukların da gösterdiği gibi, bu bedel başka hiçbir zaman birbirimizin kafalarının içine girmeye çalıştığımız anlardaki kadar yüksek olmaz. Bu noktada da algoritmik oyun teorisi bize mekanizma tasarımı üzerine yeniden düşünmek için bir yol sunar: Oyunların sadece sonuçlarını değil, aynı zamanda oyunculardan beklenen hesaplama çabalarını da göz önüne almayı.

Örneğin görünüşte masum olan artırma yöntemlerinin nasıl her türlü soruna neden olabileceğini gördük: Aşırı derecede düşünmek, aşırı derecede ödeme yapmak ve sağanak. Ancak durum tamamen de ümitsiz olmayı gerektirmez. Aslında tıpkı sıcak bir bıçağın tereyağını kolaylıkla kesmesi gibi bu zorlukların üstesinden kolaylıkla gelebilen belirli bir artırma usulü vardır. Buna Vickrey usulü açık artırma denir.

İsmi Nobel ödüllü ekonomist William Vickrey'den alan bu yöntem tıpkı ilk fiyat artırma usulü gibi "kapalı tekliflerin" yer aldığı bir süreçtir. Burada her katılımcı basit bir şekilde gizli olan tek teklifi gösteren sayıyı yazar ve en büyük teklifi veren kazanır. Ancak bir Vickrey açık artırmasında kazanan kişi kendi teklifini değil, ikinci en yüksek teklifi öder. Yani eğer siz 25 dolar ben de 10 dolar teklif verirsek siz açık artırmayı benim teklif ettiğim rakamla kazanmış olursunuz: Sadece 10 dolar ödemek zorundasınız.

Bir oyun teorisyenine göre Vickrey açık artırmasının bir dizi çekici özelliği mevcuttur. Ve algoritmik bir oyun teorisyeni açısından bir özellik hemen öne çıkmaktadır: Katılımcılar dürüst olma konusunda teşvik edilmektedir. Aslında sadece gerçek değer olarak düşündüğünüz rakamı teklif etmekten daha iyi bir strateji yoktur: Tam olarak söz konusu nesnenin değerinin ne olduğunu düşünüyorsanız o kadar. Gerçek değer olarak düşündüğünüzden daha fazlasını teklif etmek açık bir şekilde aptallıktır çünkü değerinden daha fazlasına bir şey satın alabilirsiniz. Ve gerçek değerinden daha düşük bir rakam teklif etmek de hiç gerek yokken açık artırmayı kaybetme riskine neden olur çünkü size hiçbir para kazancı getirmez: Çünkü eğer kazanacak olursanız sadece en yüksek ikinci teklif kadar ödeme yapacaksınız; kendi teklifinizin ne kadar yüksek olduğundan tamamen bağımsız olarak. Bu durum da Vickrey açık artırma usulünü mekanizma tasarımcılarının “stratejilere karşı dayanıklı” ya da sadece “gerçekçi” dediği şekilde kılmaktadır. Vickrey açık artırma usulünde dürüstlük kelimesinin tam anlamıyla en iyi politikadır.

Daha da iyisi, dürüstlük diğer teklif verenlerin kendilerine karşı ne kadar dürüst olduklarından da bağımsız bir şekilde en iyi politika olmayı sürdürmektedir. Tutsak ikileminde suç ortağınız ne yapmaya karar verirse versin sizin onun ortaklığından ayrılmanın nasıl baskın bir strateji hâline geldiğini görmüştük. Diğer taraftan bir Vickrey açık artırmasında dürüstlük baskın stratejidir. Bu da mekanizma tasarımcısının cenneti gibi bir durumdur. Strateji geliştirmek ya da yinelemek durumunda değilsiniz.

İlk bakışta Vickrey yöntemi satıcıya biraz paraya mal olur gibi görünmektedir fakat bu tam olarak doğru değildir. İlk fiyatlı bir açık artırmada teklifte bulunan her kişi gereğinden fazla ödeme yapmamak için teklifini gölgelemektedir. İkinci teklifin ödendiği Vickrey de ise bunu yapmaya gerek yoktur; zaten açık

artırmanın kendisi bir nevi teklifleri gölgelendirme vazifesi görmektedir. Aslında “gelir dengeleme” denilen bir oyun teorisi prensibi zaman içerisinde ilk fiyatın kazandığı bir artırmada beklenen satış fiyatının ortalamasının bir Vickrey artırımındaki değere yakınsayacağını ortaya koymuştur. Bu nedenle de Vickrey dengesi diğer teklif verenler her ne yaparsa yapsın aynı kişinin kazanmasını içerir. Tim Roughgarden’ın da Stanford’daki öğrencilerine söylediği gibi, Vickrey açık artırma usulü “harikadır”.

İbrani Üniversitesi algoritmik oyun teorisyeni Noam Nisan’a göre bu harikalığın neredeyse ütopyeğe varan bir havası vardır. “Yalan söylemenin fayda sağlamadığı şeklinde topluluk kurallarına sahip olmak ve kimsenin bu nedenle yalan söylememesini istersiniz, değil mi? Temel düşünce budur. Benim bakış açım göre Vickrey hakkında harika olan şey, bunun genel olarak gerçek olmasını beklemezsiniz. Özellikle de bir açık artırmada olduğu gibi daha az ödeme yapmak isterken istediğimi nasıl alabilirim? Ve işte tam da burada Vickrey usulü ortaya çıkmaktadır, işte benim yapmak istediğim budur. Bunun gerçekten harikulade olduğunu düşünüyorum.”

Aslında buradan alınacak ders açık artırımların da ötesine uzanmaktadır. Nobel ödülü onuruna sahip Roger Myerson, stratejik olarak gerçeği maskeleyi gerektiren herhangi bir oyunun sadece basit dürüstlükten başka şey gerektirmeyen bir oyuna dönüştürülebileceğini ispatlamıştır. Myerson’un o zamanki meslektaşısı Paul Milgrom şöyle demektedir: “Farklı taraftan bakıldığında sadece şok edici ve muhteşem, diğer taraftan ise önemsiz ve sıradan türden bir sonuçtur. Ve bu tamamen harikadır. O kadar harikadır ki görebileceğiniz en iyi şeylerden birine baktığının farkındasınızdır.”

Açığa vurma prensibini hemen kabul etmesi zor gibi görünebilir ama kanıtı ise oldukça akla yatkındır. Sizin yerinize oyunu

Bir oyun teorisyenine göre Vickrey açık artırmasının bir dizi çekici özelliği mevcuttur. Ve algoritmik bir oyun teorisyeni açısından bir özellik hemen öne çıkmaktadır: Katılımcılar dürüst olma konusunda teşvik edilmektedir. Aslında sadece gerçek değer olarak düşündüğünüz rakamı teklif etmekten daha iyi bir strateji yoktur: Tam olarak söz konusu nesnenin değerinin ne olduğunu düşünüyorsanız o kadar. Gerçek değer olarak düşündüğünüzden daha fazlasını teklif etmek açık bir şekilde aptallıktır çünkü değerinden daha fazlasına bir şey satın alabilirsiniz. Ve gerçek değerinden daha düşük bir rakam teklif etmek de hiç gerek yokken açık artırmayı kaybetme riskine neden olur çünkü size hiçbir para kazancı getirmez: Çünkü eğer kazanacak olursanız sadece en yüksek ikinci teklif kadar ödeme yapacaksınız; kendi teklifinizin ne kadar yüksek olduğundan tamamen bağımsız olarak. Bu durum da Vickrey açık artırma usulünü mekanizma tasarımcılarının “stratejilere karşı dayanıklı” ya da sadece “gerçekçi” dediği şekilde kılmaktadır. Vickrey açık artırma usulünde dürüstlük kelimenin tam anlamıyla en iyi politikadır.

Daha da iyisi, dürüstlük diğer teklif verenlerin kendilerine karşı ne kadar dürüst olduklarından da bağımsız bir şekilde en iyi politika olmayı sürdürmektedir. Tutsak ikileminde suç ortağınız ne yapmaya karar verirse versin sizin onun ortaklığından ayrılmanın nasıl baskın bir strateji hâline geldiğini görmüştük. Diğer taraftan bir Vickrey açık artırmasında dürüstlük baskın stratejidir. Bu da mekanizma tasarımcısının cenneti gibi bir durumdur. Strateji geliştirmek ya da yinelemek durumunda değilsiniz.

İlk bakışta Vickrey yöntemi satıcıya biraz paraya mal olur gibi görünmektedir fakat bu tam olarak doğru değildir. İlk fiyatlı bir açık artırmada teklifte bulunan her kişi gereğinden fazla ödeme yapmamak için teklifini gölgelemektedir. İkinci teklifin ödendiği Vickrey de ise bunu yapmaya gerek yoktur; zaten açık

artırmanın kendisi bir nevi teklifleri gölgelendirme vazifesi görmektedir. Aslında “gelir dengeleme” denilen bir oyun teorisi prensibi zaman içerisinde ilk fiyatın kazandığı bir artırmada beklenen satış fiyatının ortalamasının bir Vickrey artırımındaki değere yakınsayacağını ortaya koymuştur. Bu nedenle de Vickrey dengesi diğer teklif verenler her ne yaparsa yapsın aynı kişinin kazanmasını içerir. Tim Roughgarden’ın da Stanford’daki öğrencilerine söylediği gibi, Vickrey açık artırma usulü “harikadır”.

İbrani Üniversitesi algoritmik oyun teorisyeni Noam Nisan’a göre bu harikalığın neredeyse ütopyeğe varan bir havası vardır. “Yalan söylemenin fayda sağlamadığı şeklinde topluluk kurallarına sahip olmak ve kimsenin bu nedenle yalan söylememesini istersiniz, değil mi? Temel düşünce budur. Benim bakış açım göre Vickrey hakkında harika olan şey, bunun genel olarak gerçek olmasını beklemezsiniz. Özellikle de bir açık artırmada olduğu gibi daha az ödeme yapmak isterken istediğimi nasıl alabilirim? Ve işte tam da burada Vickrey usulü ortaya çıkmaktadır, işte benim yapmak istediğim budur. Bunun gerçekten harikulade olduğunu düşünüyorum.”

Aslında buradan alınacak ders açık artırımların da ötesine uzanmaktadır. Nobel ödülü onuruna sahip Roger Myerson, stratejik olarak gerçeği maskeleyi gerektiren herhangi bir oyunun sadece basit dürüstlükten başka şey gerektirmeyen bir oyuna dönüştürülebileceğini ispatlamıştır. Myerson’un o zamanki meslektaş Paul Milgrom şöyle demektedir: “Farklı taraftan bakıldığında sadece şok edici ve muhteşem, diğer taraftan ise önemsiz ve sıradan türden bir sonuçtur. Ve bu tamamen harikadır. O kadar harikadır ki görebileceğiniz en iyi şeylerden birine baktığının farkındasınızdır.”

Açığa vurma prensibini hemen kabul etmesi zor gibi görünebilir ama kanıtı ise oldukça akla yatkındır. Sizin yerinize oyunu

oynayan bir avukat ya da temsilciniz olduğunu hayal edin. Eğer çıkarlarınızı gözetmek için onlara güvenirseniz, o zaman onlara sadece tam olarak ne istediğinizi söyler ve tüm stratejik teklif verme ve yineleme stratejilerini sizin adınıza yerine getirmelerine izin verirsiniz. Vickrey artırma usulünde de oyunun kendisi bu işlevi görür. Ve açığa vurma prensibi sadece bu fikri genişletir: Sizin yerinize onlara gerçeği söyleyeceğiniz temsilcileriniz tarafından oynanabilen herhangi bir oyun dürüstlüğün en iyi strateji olduğu bir oyuna dönüşecektir. Nisan'ın da belirttiği gibi, “Temel olan şey eğer müşterilerinizi size karşı optimize etmelerini istemezseniz, onlar için siz optimize etmelisiniz. Tüm kanıt bundan ibarettir... Eğer sizin için kendisi optimize eden bir algoritma tasarlırsam, yapabileceğiniz hiçbir şey yoktur.”

Algoritmik oyun teorisi geçen 20 sene içerisinde birçok pratik uygulamaya çok büyük katkıda bulunmuştur: İnternetteki paket gönderimi ve yönlendirmesini anlamamıza yardımcı olmuş, değerli kamu mallarını ilgilendiren FCC açık artırmalarını iyileştirmiş ve tıp fakültesi öğrencilerini hastanelerle eşleştiren algoritmaları geliştirmiştir. Ve bu muhtemelen daha büyük bir değişimin sadece başlangıcıdır. Nisan şöyle demektedir: “Daha sadece yüzeyi kazıyaktayız. Teorik olarak sadece anlamaya başlamaktayız. Ve bugün teorik olarak tamamen anlamış olduğum şeyin insanlara uygulanmasına bir nesil daha süre vardır. Bence en fazla bu kadarlık bir süre vardır; bir nesil kadar. Bu bir nesil sürecektir.”

Fransız varoluşçu filozof Jean Paul Sartre'nin meşhur bir sözü vardır: “Cehennem başkalarıdır.” Diğer kişilerin doğuştan kötü ya da sevimsiz olduklarını ima etmemiştir, bunun yerine kastettiği şey başkalarının bizim kendi düşünce ve inanışlarımızı karmaşıktırdıklarıdır:

Kendimizi düşündüğümüzde, kendimizi tanımaya çalıştığımızda... Diğer kişilerde hâlihazırda olan bilgileri kullanırız. Kendimizi diğer kişilerde olan yollarla değerlendiririz. Kendim hakkımda her ne söylersem söyleyeyim başka kişilerin yargıları her zaman bunun içine dâhil olur. Kendim hakkımda her ne hissedersen hissedeyim başka kişilerin yargıları her zaman bunun içine dâhil olur... Ancak bu durum, bir kişinin diğer kişilerle ilişkileri olamayacağı anlamına gelmez. Sadece her birimiz için diğer kişilerin büyük önemini ortaya koyar.

Belki de kitabın bu bölümünde gördüklerimizi göz önüne aldığımızda Sartre'nin ifadesini revize etmek isteyebiliriz. Diğer kişilerle etkileşimde olmak bir kâbus olmak zorunda değildir; yanlış bir oyunda kesin olabileceğine rağmen. Keynes'in de gözlemlemiş olduğu gibi popülerlik karmaşıktır, çözümsüzdür ve sonsuz bir aynalar salonu gibidir ama güzellik öyle değildir. Diğer kişilerin taktikleri nedeniyle tahminde bulunmayı, anlamayı ya da hareket tarzını değiştirmeyi içermeyen bir strateji benimsemek döngüye girme konusundaki düğümü kesmenin bir yoludur. Ve bazen bu strateji sadece kolay değil, aynı zamanda optimaldir.

Eğer stratejileri değiştirmek işe yaramazsa, oyunu değiştirmeyi deneyebilirsiniz. Ve eğer bu da mümkün değilse, en azından hangi oyunları oynamayı seçeceğiniz konusunda biraz kontrol sahibi olabilirsiniz. Cehenneme giden yol çözümsüz yinelemeler, kötü dengeler ve bilgi taşmalarıyla döşenmiştir. Dürüstlüğün baskın strateji olduğu oyunlar arayın. Daha sonra da sadece kendiniz olun.

Sonuç

Bilişimsel Nezaket

İnsanlar hakkındaki önemli şeylerin karakter olarak sosyal olduğuna ve şu anki birçok talebimizin makinelerle karşılanmasının en sonunda insanlara birlikte nasıl iyi bir şekilde yaşanılacağını öğrenmek için zaman ve teşvik sağlayacağına kuvvetli bir şekilde inanmaktayım.

—Merrill FLOOD

Zaman ve mekân sınırlamasına tabi herhangi dinamik bir sistem temel ve kaçınılmaz bazı problemlerle karşı karşıyadır. Bu sorunlar doğaları gereği bilişimle ilgilidir ve bu da bilgisayarları sadece birer araç değil, aynı zamanda yoldaşlarımız yapmaktadır. Bu durumdan da üç basit bilgelik parçası ortaya çıkmaktadır.

İlk olarak bilgisayar bilimcilerinin ve matematikçilerin insanların problemlerine kolayca aktarılabilecek iyi algoritmik yaklaşımlar belirledikleri durumlar vardır. Yüzde 37 Kuralı, Son Zamanda En Az Kullanılan kriteri ve Üst Güven Sınırının hepsi bunlara birer örnektir.

İkinci olarak optimal bir algoritma kullandığınızı bilmek, aradığınız sonuçları almasanız bile sizi rahatlatmalıdır. Yüzde

37 Kuralı, yüzde 63 olasılıkla başarısız olmaktadır. Önbelleğini-
zi LRU ile yönetmek aradığınız şeyleri her zaman bulacağınızı
garanti etmez. Araştırma/kullanma dengesini bulmak için Üst
Güven Sınırı yaklaşımını kullanmak hiçbir pişmanlığınız olma-
yacağı anlamına gelmez. Sadece bu pişmanlıklar, hayatta ilerle-
dikçe daha yavaş bir şekilde birikeceklerdir. En iyi strateji bile
bazen kötü sonuç verir. Bu nedenle bilgisayar bilimi “süreç” ve
“sonuç” arasındaki ayrımı yapmaya çalışır. Eğer muhtemel en
iyi stratejiyi izlediyseniz, yapabileceğiniz en iyi şeyi yapmışsı-
nızdır ve eğer işler istediğiniz şekilde gelişmezse kendinizi suç-
lamamalısınız.

Sonuçlar manşetlere çıkar -asında içinde yaşadığımız dünya-
yı oluştururlar-, bu nedenle de onlara takılıp kalmak çok kolay-
dır. Ancak üzerinde kontrol etkisine sahip olduğumuz şey ise
süreçlerdir. Bertrand Russel bununla ilgili şunları söylemiştir:
“Objektif haklılığı değerlendirmede olasılığı da göz önüne alma-
mız gerekiyor... Objektif olarak doğru hamle muhtemelen en
kısmetli olandır. Buna en akıllıca olan eylem diyeceğim.” Şanslı
olmayı umabiliriz ama zeki davranmak için de çabalamalıyız.
Buna bilişim açısından bir tür sebat göstermek de diyebiliriz.

Son olarak basit ve doğrudan çözümler uygulanabilen ve uy-
gulanamayan problemler arasındaki ayrımı açık bir şekilde yap-
abiliriz. Eğer çözümsüz bir senaryoda sıkışıp kalırsanız, hüristik-
leri (sezgisel yaklaşımları), yakınsamaları ve rastlantısallığın
stratejik kullanımının size işe yarar çözümler bulmada yardımcı
olabileceğini hatırlayın. Bilgisayar mühendisleriyle yaptığımız
görüşmelerde defalarca karşımıza çıkan bir tema şudur: Bazen
“yeteri kadar iyi” aslında gerçekten de yeteri kadar iyidir. Daha-
sı, karmaşıklığın farkında olmak problemlerimizi seçmede bize
yardımcı olur: Eğer karşılaşacağımız durumlar üzerinde bir kont-
rölümüz varsa, çözülebilir sorunları seçmeliyiz.

Sadece problemlerimizi seçmeyiz. Aynı zamanda birbirimize karşı oluşturduğumuz problemleri de seçeriz, ister bir şehri tasarlama şeklimiz olsun isterse de bir soruyu sorma şeklimiz olsun. Bu durum bilgisayar biliminden ahlak konusuna ilginç bir köprü yaratır: Bilişim nezaketi dediğimiz bir prensip şeklinde.

•

Bu kitapta yer alan görüşmeleri planlarken ikimizin de yaşadığı belirli bir paradoks vardı. Görüştüğümüz kişiler ortalama olarak “önümüzdeki Salı günü 13.00-14.00 arası görüşelim” gibi bir şey dediğimizde, “önümüzdeki hafta ne zaman uygunsa” dememize nazaran daha müsait olmaktaydı. Bu ilk bakışta saçma gibi görünmektedir. Örneğin insanların 8.000 penguinin hayatını kurtarmaya yetecek paradan daha fazlasını sadece bir penguin kurtarmak için harcaması gibi. Görüşmeleri planlama durumunda ise insanlar kısıtlanmış bir problemle karşılaşmayı tercih ediyor gibi görünmekteydi, kısıtlar sıkışık olsa bile. Kendi tercihlerimizi ve kısıtlarımızı bunlara uydurmak, daha iyi bir seçenek hesaplamaktan daha kolay gibi görünmekteydi. Bilgisayar mühendisleri burada başlarını onaylarcasına sallayacaklar ve “onaylama” ile “arama” arasındaki boşluktan bahsedeceklerdir. Bu da iyi bir şarkıyı duyduğunuz anda bunun iyi olduğunu anlamak ile hemen o anda iyi bir şarkı yazmak arasındaki boşluk kadar büyük bir boşluktur.

Bilgisayar biliminin üstü kapalı kurallarından biri, kulağa her ne kadar garip gelse de hesaplama işleminin *kötü* olduğudur: Herhangi bir algoritmanın altta yatan temel amacı düşünce iş yükünü minimize etmektir. Diğer insanlarla etkileşimde bulunduğumuzda onlara aslında hesaplamayla ilgili sorunlar sunmuş oluruz: Sadece açıkça ortada olan talep ve istekler olarak değil, aynı zamanda üstü kapalı olan niyetlerimizi, inançlarımızı ve tercihlerimizi anlamaları gereği gibi. Bu nedenle bu tarz problemlerin bilişimsel olarak anlaşılması insan etkileşiminin doğası-

na ışık tutması akla yatkın görünmektedir. Altta yatan etkileşimle alakalı bu tarz problemleri kolaylaştıracak şekilde sorunları belirli çerçevelere oturtarak “bilişimsel nezaket” gösterebiliriz. Bu çok önemlidir çünkü birçok sorun -özellikle de buraya kadar görmüş olduğumuz gibi sosyal olanlar- doğaları gereği ve içinden çıkılamayacak şekilde zordur.

Şu çok bilindik senaryoyu düşünün. Bir grup arkadaş dolaşmaya çıkmıştır ve akşam yemeği için nereye gideceklerine karar vermeye çalışmaktadır. Her birinin açık bir şekilde tercihleri vardır fakat bunlar genel olarak zayıf kalmaktadır. Hiçbiri bu tercihlerini açık bir şekilde ifade etmek istememektedir ve bu nedenle tahmin ve yarım ipuçları içinde gezinip durmaktadır.

Herkes için tatmin edici bir sonuca elbette ulaşabilirler. Ancak bu prosedür çok kolay bir şekilde kötüye ilerleyebilir. Örneğin Brian ve iki arkadaşı üniversiteyi bitirdikleri senenin yazında İspanya'ya gittiler. Uçuş esnasında seyahat planları üzerine konuştular ve sonuçta planladıkları boğa güreşini izlemeye gitmek için yeterli zamanları olmayacağını anladılar. Tam da o sırada her biri diğer ikisini bundan vazgeçirmek için harekete geçti ve bir anda aslında hiçbirinin gerçekte boğa güreşini izlemek istemediklerini fark ettiler. Her biri sadece diğerlerinin şevklerine uyum sağlamayı tercih etmiş ve bu şekilde de karşısındakilerin katıldığı oyunun heyecan ve şevk düzeyini oluşturmuşlardı.

Benzer şekilde masum görünen “Benim programım müsait” ya da “Bu akşam ne yapmak istersin?” gibi ifadelerin sizin iki kez düşünmenizi gerektirecek karanlık yanları vardır. Üzerinde âdeta bir nezaket ve kibarlık kaplaması vardır lakin tehlike çanlarını çaldıran iki eylemi vardır. İlk olarak zihni yükü karşı tarafa paslar: “İşte sorun burada, sen hallet.” İkinci olarak da kendi tercihlerinizi ifade etmeyerek diğerlerini bunları hayal etmeye ya da tahmin etmeye zorlarsınız. Ve buraya kadar da görmüş olduğumuz kadarıyla diğerlerinin zihinleriyle ilgili işlemler, bir kişi-

nin zihninin ya da bir makinenin karşılaşılabileceği en büyük zorluklardan biridir.

Bu gibi durumlarda bilişimsel nezaket ve adabımuaşeret kuralları bir anda birbirinden ayrılır. Kendi tercihlerinizi kibar bir şekilde kendinize saklamak, bunları tahmin etme ya da davranışlarınızdan çıkarma yükünü grubun kalanının üzerine yıklar. Buna karşılık kişisel tercihlerinizi kibar bir şekilde ifade etmek (“Kişisel olarak ben x ’i tercih ederim. Siz ne düşünüyorsunuz?”) grubu bir çözüme doğru taşıma eylemine yardımcı olur.

Buna alternatif olarak, diğer kişilere sunduğunuz seçenek sayısını maksimize etmek yerine azaltmayı deneyebilirsiniz. Örneğin 10 restoran yerine iki ya da üç tanesinin arasından tercih edilmesini önerebilirsiniz. Eğer gruptaki herkes en az istediği seçeneği elerse, karar vermek herkes için daha kolay bir hâl alır. Ve eğer birini öğle yemeği için bir yere davet ediyor ya da bir toplantı planlıyorsanız; kabul edebilecekleri ya da reddedebilecekleri bir ya da iki somut seçenek sunmak iyi bir başlangıç noktasıdır.

Bu eylemlerin hiçbiri aslında “kibar” değildir fakat bunların tümü etkileşimin bilişimsel maliyetini önemli miktarda azaltabilir.

•

Bilişimsel nezaket sadece bir davranış prensibi değil, aynı zamanda bir tasarım prensibidir.

2003 senesinde Waterloo Üniversitesi’nden bilgisayar mühendisi Jeffrey Shallit, ABD’de tedavüle konsaydı kaç sentlik bir bozuk paranın para üstü olarak kullanılan bozuk parayı minimize edeceği sorusunu araştırdı. Sonuçta karşısına çıkan cevap 18 sentlik bir bozuk paraydı fakat Shallit bilişimsel endişelerinden ötürü bu sonuçlarla bir politika önerisinde bulunmadı.

Bugünlerde para üstü vermek son derece kolaydır. Herhangi bir para üstü miktarı için, para üstü verilecek tutarı aşmadan ve-

rebildiğiniz kadar 25 sentlik, daha sonra mümkün olduğu kadar 10 sentlik verin ve bu şekilde devam edin. Örneğin 54 sentlik bir para üstü iki 25 sentlik ve 4 tane 1 sentliktir. 18 sentlik bir bozuk para için ise bu basit algoritma artık optimal değildir: 54 sent artık üç tane 18 sentlik ile geri verilir ve 25 sentlik bozukluklar hiç kullanılmaz. Aslında Shallit, bu tarz yeni yaratılacak bozuk para miktarlarının para üstü verme problemini “en az seyyar satıcı problemi kadar zor kıldığını” fark etmiştir. Bu da bir kasiyerdan istenebilecek olandan çok fazlasıdır. Eğer hesaplamaların kolaylığı dikkate alınacak olursa Shallit ABD’de tedavülde olacak 2 ya da 3 sentlik bozuk paraların en çok işe yarayacağını tespit etti. 18 sentlik bir bozuk para kadar heyecan verici değil ancak neredeyse onun kadar iyidir ve bilişim nezaketi açısından ise çok öndedir.

Buradaki önemli husus, tasarımdaki küçük değişikliklerin kullanıcıların karşısındaki algısal problemlerin türünü oldukça önemli miktarda değiştirebileceğidir. Örneğin mimarlar ve şehir planlamacılarının çevremizi nasıl inşa edeceklerine dair seçimleri vardır. Bu da çözmek zorunda olduğumuz bilişimsel problemleri nasıl yapılandıracaklarına dair seçenekleri olduğu anlamına gelmektedir.

Stadyum ya da alışveriş merkezlerinde olan türden, çok fazla araç park yerine sahip büyük bir otopark düşünün. Araç park yerlerinin bulunduğu sıralardan birinde hedefinize doğru ilerlerken boş bir yer görürsünüz fakat daha ileride ve varış noktanıza daha yakın bir yer bulmak ümidiyle buraya park etmezsiniz. Fakat daha sonra boş yer bulamadan hedefinize ulaşır, bu sefer başka bir park sırasında aramaya devam edersiniz. Belirli bir süre araç sürdükten sonra bir başka boş yerin aracınızı park etmek için yeteri kadar iyi olup olmadığına ya da bir başka sırada aramaya devam edip etmemeye karar vermeniz gerekir.

Burada algoritmik bir bakış açısı kullanmak sadece sürücü için değil aynı zamanda mimar için de yararlıdır. Bir kişinin varış noktasından uzaklaşan, tek çizgi üzerinde dizili park yerlerini içeren problemle bir karşılaştıralım. Bu durumda boş olan ilk yere park edilir; oyun teorisi ya da önce araştır, sonra seç kuralı gibi şeyler yoktur. Bazı park yerleri bu şekilde tasarlanmıştır: Zemin kattan başlayarak yükselen tek bir helezon şeklinde. Bu yapıların bilişimsel yükleri sıfırdır: İlk boş yere kadar arabanızı sürersiniz ve sonra oraya park edersiniz. Bu tip yapıların başka açılardan artıları ve eksileri her ne olursa olsun, bunların sürücülere karşı algısal açıdan insancıl bir yanları olduğunu söyleyebiliriz; bunlar bilişimsel olarak naziktirler.

Tasarımın ana hedeflerinden biri insanları gereksiz gerilim, çatışma ve zihinsel yükten uzak tutmak olmalıdır. (Bu sadece soyut bir kavram değildir; AVM’lerde araç park yeri bulmak bir stres kaynağı olduğunda alışverişe gelenler daha az para harcayabilir ve daha nadiren buralara gelebilirler.) Şehir planlamacıları ve mimarlar farklı otopark tasarımlarının sınırlı alan, malzeme ve para gibi kaynakları nasıl kullanacaklarını düzenli olarak değerlendirmektedirler. Fakat tasarımlarının onları kullanan insanlara bilişimsel kaynaklar açısından nasıl bir yük getirdiklerini nadiren dikkate alırlar. Günlük yaşamlarımızın altında yatan algoritmik destekleri anlamak -bu örnekte optimal duraklama- sadece belirli bir senaryodaki sürücülerin en iyi kararları vermelelerine yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda planlamacıları sürücülerin karşılaşmalarına zorladıkları problemler konusuna daha düşünceli olmaları için teşvik eder.

Bilişimsel olarak daha nazik tasarımların kendilerini öne çıkardıkları başka durumlar da vardır. Örneğin restoranlardaki oturma planlarını düşünün. Bazı restoranların bekleyen müşterilerin bir masa boşalana kadar ortada dolaştıkları ve ilk oturanın masanın sahibi olduğu “açık oturma” politikası vardır. Diğer

restoranlar ise sizin isminizi alır, barda size bir içki ikram eder ve masanız hazır olduğunda size bilgi verir. Paylaşılan kıt kaynakların yönetimine ilişkin bu yaklaşımlar, bilgisayar bilimindeki “dönme” ve “engelleme” kavramları arasındaki ayrımı yansıtmaktadır. Devam eden bir işlem bir kaynak talep edip de alamayınca bilgisayar bunun ya “dönmesine” -kaynağı arama işlemine devam etmesine- izin verebilir ya da onu “durdurabilir”: Uygulamayı durdurur, başka bir şey üzerinde çalışır ve daha sonra kaynak müsait olduğunda ona geri döner. Bir bilgisayar mühendisi için bu pratik bir denge durumudur: Dönme ile harcanacak zamanla görev değişikliği için geçecek zamanı karşılaştırmak. Fakat bir restoranda dengelenmeye çalışılan harcanan kaynakların hepsi restorana ait değildir. “Dönme” benzeri bir politika boş masaları daha hızlı bir şekilde doldurur lakin bu sırada harcanan CPU zamanlarını harcamakta olan müşterilerin zihinleridir.

Benzer örnek olarak bir otobüs durağının neden olduğu bilişimsel problemi göz önüne alalım. Bir sonraki otobüsün “10 dakika içinde durakta olacağını” söyleyen bir ekran varsa, bundan habersiz bir şekilde her an kararınızı yeniden gözden geçirdiğiniz, gelmeyen otobüse ilişkin kanıtları kendi kendinize sayıp çıkarımlarda bulunma eylemi yerine otobüsü beklemeye karar verebilirsiniz. Dahası, dikkatinizi otobüsün geliş istikametinde yolu seyretmekten -dönme- 10 dakikalığına alabilirsiniz. (Bir sonraki gelecek otobüsün tahmin uygulamasına ihtiyaç duymayan şehirler için son otobüsün ne zaman ayrıldığına bağlı olarak Bayes yaklaşımının gelecek olanı bilmemize nasıl katkı sağladığını görmüştük.)

•

Eğer diğer kişilere karşı daha nazik olabilirsek, kendimize karşı da daha nazik olabiliriz. Sadece bilişimsel açıdan (buraya kadar değindiğimiz tüm algoritmalar ve fikirler buna yardımcı olacaktır) değil, aynı zamanda affetmek açısından da.

Rasyonel karar vermenin sezgisel standardı tüm seçenekleri dikkatli bir şekilde göz önüne almak ve en iyi olanı seçmektir. Bilgisayarlar ilk bakışta, kusursuz cevaba ulaşana kadar karmaşık hesaplamaları yaparak bu yaklaşımın en iyi örnekleri gibi görünmektedir. Fakat şu ana kadar da görmüş olduğumuz gibi bu, bilgisayarların ne yaptıklarına ilişkin eskide kalmış bir bakış açısidir: Kolay bir problem için harcanan bir lüks. Zorlu problemlerde en iyi algoritmalar en kısa zaman içinde en mantıklı şeyi yapmaya çalışır ve bu da en sonuna kadar her bir faktörü göz önüne almak ya da tüm hesaplamaları tam olarak yapmak anlamına gelmez. Hayat bunun için çok karmaşıktır.

Şu ana kadar bahsettiğimiz hemen hemen her alanda ne kadar fazla gerçek dünyaya ilişkin faktör eklersek -ister bir işe başvuranlarla görüşmedeki tam olmayan bilgi olsun, isterseniz de araştır/kullan ikilemini değiştiren dünyada çözmeye çalışın ya da işleri halletmeye çalışırken birbirine bağlı görevlerle uğraşın-, kusursuz çözümü bulduğumuz duruma ulaşmanın akla sığmayacak derecede uzun sürdüğünü gördük. Ve aslında insanlar neredeyse her zaman, bilgisayar bilimindekilerin zor olarak adlandırdığı durumlarla karşılaşır. Bu gibi zorlu durumlar karşısında etkili algoritmalar varsayımlarda bulunur, daha basit çözümlere yönelik bir ön yargı takınır, gecikme ile hata arasındaki karşılıklı dengeyi sorgular ve şansını dener.

Bunlar rasyonel şekilde hareket edemediğimizde verdiğimiz ödünler değildir. Bunlar aslında, rasyonel olmak demektir.

Notlar

Giriş

- 14 **El’Kitab’ül-Muhtasar fî Hıساب’il Cebri ve’l-Mukabele:** Kitap Hindistan 10’luk sistemine büyük bir değişiklik getirmiştir ve bu sisteme Arap rakamları şeklinde yanlış bir ifade denilmesinin nedeni de kitabın bu büyük etkisidir. Arap rakamlarının ve destekledikleri algoritmaların gelişi, yeni dalganın taraftarları (algoritmacılar) ile Roma rakamlarını destekleyen daha gelenekçi insanlar (abaküsçüler) arasında bir savaş başlattı. Durum oldukça ciddi bir hâl aldı. Floransa şehri 1339’da bankaların Arap rakamlarını kullanmalarını yasaklayan bir yasa yürürlüğe soktu. İronik bir şekilde, kelimelerle ifade edilen sayıların bir alternatifi olarak öne sürülen Roma rakamlarının “toplamları gösterme konusunda uygun olmadığı, kelimelerin ise tam da bunun için geliştirildiği” söyleniyordu. Daha fazlası için bkz. *Murray, Chapters in the History of Bookkeeping*.
- 14 **4.000 yıllık Sümer zamanına ait kil tablet:** Eski Babil Algoritmaları üzerine Knuth’ta detaylı bir analiz bulunmaktadır. Matematiksel algoritmalara vurgu yapan, algoritmalar hakkında daha fazla bilgi için bkz. Chabert, Barbin, ve Weeks: *A History of Algorithms*.
- 15 **keskin kenarlı taşlarla çalışırken:** Bu teknik “yumuşak çekiç perküsyonu” olarak bilinir.
- 15 **“Bilim, bilginin kendisinden ziyade bir düşünme biçimidir.”:** Sagan, *Broca’s Brain*.

16 **insan rasyonelliği konusundaki düşünce şeklimizi:** Sonsuz hesaplama kapasitesiyle bir problemi çözmek için sonsuz zamanı olduğunu söyleyen klasik rasyonellik konseptinin sınırlamaları, 1950’lerde psikolog, ekonomist ve yapay zekâ öncüsü Herbert Simon tarafından ortaya konulmuş (Simon, *Models of Man*) ve sonunda kendisine bir Nobel ödülü kazandırmıştır. Simon, “sınırlı rasyonelliğin” insan davranışı için daha iyi bir model olabileceğini ileri sürmüştür. Simon’un görüşleri matematik ve bilgisayar bilimi alanlarında karşılık bulmuştur. Alan Turing’in meslektaşı I. J. Good (“tekillik” konsepti ve 2001: *A Space Odyssey* için HAL 9000 konusunda Stanley Kubrick’e danışmanlık yapmasıyla ünlüdür) bu tarz düşünceye “Tip II Rasyonellik” demiştir. Eski Tip I model rasyonellik sadece doğru cevaba ulaşmayı göz önünde bulundururken Tip II Rasyonellik ise bu cevabı bulmanın maliyetini, zamanın da kesinlik kadar önemli bir para birimi olduğunun farkında olarak göz önüne almıştır. Daha fazlası için bkz. Good, *Good Thinking*.

21’inci yüzyıl yapay zekâ uzmanları ayrıca “sınırlı optimalliği” de tartışmışlardır. Zaman ve hata karşısında en iyi dengeyi kuran algoritmayı seçmenin işlevsel zekaya sahip ajanlar yetiştirmek için önemli olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu durum, yapay zekâ üzerine çok satan *Artificial Intelligence: A Modern Approach* kitabının yazarlarından olan Berkeley Üniversitesi’nden bilgisayar bilimci Stuart Russell ile Microsoft araştırma bölümünün başında yer alan Eric Howitz tarafından da dile getirilmiştir. Bkz. Russel ve Wefald, *Do The Right Thing* ve Horvitz ile Zilberstein, *Computational Tradeoffs Under Bounded Resources*. Tom ve meslektaşları bu yaklaşımı insan anlayışının ve düşünme şeklinin modellerini geliştirmek için kullanmışlardır. Bkz. Grifiths, Lieder ve Goodman, *Rational Use of Cognitive Resources*.

16 **bir matematikçiye benzetmişti:** Turing’in “*On Computable Numbers*” eserinin dokuzuncu kısmında Turing’in şimdilerde Turing Makinesi dediğimiz şeyi tanımlamadaki seçimleri, bir kişinin yapabileceği operasyonlarla bunları karşılaştırarak savunur. İki boyutlu bir kâğıt parçası tek boyutlu bir banta dönüşür, inanın zihni makinenin zihni olur ve semboller kişi ya da makine kâğıt üzerinde gezindikçe yazılır ve okunur. Hesaplama bir bilgisayarın yaptığı şeydir ve geçmiş zamanlarda tek “hesaplama yapanlar” insanlardı.

- 17 **İnsanların rasyonel olmadığını ve hataya meyilli olduğunu:** Örnek olarak bkz. Gilovich, *How We Know What Isn't So*; Ariely ile Jones, *Predictably Irrational*; ve Marcus, *Kluge*.

1. Optimal Duraklama (Optimal Stopping)

- 21 **“Tüm Hristiyanlar...”:** 23 Ekim 1613 tarihli, Kepler’den “bilinmeyen asil bir kişiye” yazılan mektuptan. Bkz. Baumgardt, *Johannes Kepler*.
- 21 **yaygın bir olgu:** <http://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=120913056> ve <http://jezebel.com/5862181/technology-cant-stop-the-turkey-drop>
- 22 **Herhangi bir optimal... probleminde:** Daha fazla bilgi ve muhteşem bir referans için bkz. Ferguson, *Optimal Stopping and Applications*.
- 22 **optimal duraklama problemlerinin en ünlüsü:** Sekreter probleminin doğası ve kaynağına ilişkin detaylı anlatım Ferguson’un “*Who Solved the Secretary Problem?*” yazısında yer almaktadır.
- 23 **Sekreter probleminin basılı olarak ilk defa:** Gardner’ın yazdıkları, Minneapolis-Honeywell Regulator Company’den John Fox ve MIT’den Gerald Marnie tarafından geliştirilmiş “Googol Oyunu” denilen bir salon oyunu hakkındadır. Aşağıda, Fox’un ağzından Gardner’a yazılan mektuptaki açıklamayı okuyabilirsiniz. (Gardner’a gönderilen ve bizim bu kitapta atıfta bulunduğumuz tüm mektuplar, Martin Gardner’ın Stanford Üniversitesi Kütüphanesi, 1’inci seri, 5’inci kutu 19’uncu klasörde yer alan yazılarından alınmıştır.)

İlk oyuncu istediği kadar sayıda farklı kâğıda birbirinden farklı pozitif sayı yazar. Daha sonra bunları karıştırır, ters çevirir ve sonra her seferinde bir tanesini açacak şekilde sırayla açmaya başlar. İkinci oyuncu istediği bir anda durmasını söyler. Eğer kâğıttaki sayı, yazılı olanlar içerisinde en büyük olan sayı ise ikinci oyuncu, aksi takdirde birinci oyuncu kazanır.

Fox, ayrıca oyunun isminin genellikle ilk kâğıda yazılan ve ikinci oyuncunun bu kâğıdın en büyük kâğıt olmasını düşünmesini sağlayacak şekilde çok büyük bir sayı olan “bir googol”dan (deste içerisinde bir yerde iki googol da bulunmaktadır) geldiğini açıklamaktadır. Daha sonra ikinci oyuncu için optimal stratejinin kâğıtların yarısının açılmasını beklemek ve daha sonra ilk yarıdaki kâğıtların en büyüğünden

daha büyük bir sayı geldiğinde bunu seçmek olduğunu belirtmiştir ve bu taktikle kazanma şansı yüzde 34,7'ye yaklaşmaktadır.

Gardner, Alberta Üniversitesi'nde bir matematikçi olan Leo Moser'a, problem hakkında daha fazla şey öğrenmek maksadıyla mektup yazmıştır. Moser, bu konuyla yakından ilişkili bir konuda 1956 senesinde bir makale (Moser, On a Problem of Cayley) kaleme almıştır. Moser bu makalesinde ilk olarak 1875 senesinde ünlü İngiliz matematikçi Arthur Cayley tarafından öne sürülen fikirlerden (bkz. Cayley, *Mathematical Questions*; Cayley, *Collected Mathematical Papers*) çok etkilenmiştir. Cayley tarafından ileri sürülen versiyon şu şekildedir:

Bir piyango şu şekilde düzenlenmektedir: Sırası ile a , b ve c potundur simgeleyen n adet bilet vardır. Bir kişi bir bilet çeker, buna bakar ve eğer isterse (kalan $n-1$ adet bileten) bir bilet daha çeker, buna da bakar ve yine eğer isterse (bu sefer kalan $n-2$ bileten) bir bilet daha çeker. Bu böyle devam eder ve k sayısını geçmeyecek kadar bilet çeker ve son çekilen biletin değeri kadar kazanır. Eğer olasılık teorisi açısından kendisi için en avantajlı şekilde bu işlemleri yaptığını varsayarsak, beklentisinin değeri nedir?

Moser bu soruya, bir bilgi parçası daha ekledi. Biletlerin herhangi bir değer alma olasılıklarının 0 ile 1 arasında eşit olduğunu söyledi.

Cayley probleminde ve sonrasında gelen Moser'ın ufak değişikliğinde (bazen bu iki probleme birlikte Cayley-Moser problemi de denilmektedir) kazanılan şey, seçilen biletin değeridir ve burada uğraşılacak şey en yüksek ortalama getiriye sağlayan stratejiyi bulmaktır. Cayley ve Moser'in probleminin sekreter probleminden (ve Googol Oyunu'ndan) ayrıldığı nokta işte burasıdır. Tek en büyük değeri (sadece en iyinin bir işe yarayacağı) bulmaktansa seçilen değer ortalama değerini maksimize etmek gerekir. Moser'ın 1956'daki makalesi sadece bu soruna iyi bir çözüm sunduğu için değil, aynı zamanda optimal duraklamanın gerçek yaşamdaki sonuçlarından bahseden ilk yazı olmasından dolayı da dikkat çekicidir. Moser iki muhtemel senaryodan bahsetmektedir:

1. Turist problemi: Araba ile seyahat etmekte olan bir turist yol haritasında belirtilmiş olan n adet otelden bir tanesinde geceyi geçirmek için durmak ister. En rahat konaklama imkânı olanda

durmayı istemekte ama aynı zamanda doğal olarak yolculuğunun bir kısmını geçtiği yerlere geri giderek geçirmeyi de istememektedir. Durma için hangi kriterleri kullanmalıdır?

2. Bekâr Açmazı: Bekâr bir kişi kendisiyle evlenmek isteyen ve “değerini” tahmin edebileceği bir bayanla tanışır. Eğer onu geri çevirirse asla yeniden onu elde edemeyecektir fakat gelecekte toplamda n adet şansının olacağı başka bayanlarla da tanışacaktır. Hangi durumlarda evlenmeye karar vermelidir?

Karşı cinsten olan kişilerle bir nevi gönül eğlendirme olarak da görülebilecek bu durum Gardner’in Googol Oyunu üzerine 1960’da yayınladığı makalesinde kendisine yer bulmuştur.

Moser doğru çözümü -yüzde 37 kuralını- Gardner’a önermişti ama 26 Ağustos 1959’daki mektubu problemin daha eski bir hâlinin de olabileceğini ileri sürmekteydi. “Aynı probleme Seattle’daki Boeing havacılıktan R. E. Gaskell’in 1959 Ocak ayına ait notlarında da rastladım. Problemin Dr. G. Marsaglia’ya ait olduğunu belirtmektedir.”

Gardner’ın bu konudaki merhametli çıkarımı Fox ve Mernie’nin özellikle sadece Googol Oyunu’nu ortaya çıkarılması konusunda (daha geniş olan problem alanında değil) hak iddia etmeleriydi ve bu hususu oldukça dikkatli bir biçimde köşe yazısında belirtmişti. Fakat benzer problemlerin daha önceki varlığına ve problemin çeşitli matematikçiler arasında dolaştığına dair atıfların yer aldığı mektuplar kendisine ulaştı.

- 23 **Lakin problemin ilk kaynağı şaşırtıcı bir şekilde gizemlidir:** Gilbert ve Mosteller, *Recognizing the Maximum of a Sequence* isimli sekreter problemi üzerine en otoriter bilimsel makalelerinde “bu sorunun ilk yaratıcılarını ortaya çıkarma çabalarının başarısız olduğunu” kabul etmektedirler. Ferguson’un “Who Solved the Secretary Problem?” isimli çalışması sekreter probleminin heyecan verici ve matematiksel açıdan oldukça detaylı bir geçmişini, bazı çeşitlerini de içerecek şekilde bizlere sunmaktadır. Ferguson, Gardner tarafından tanımlanan problemin aslında çözülmemiş olduğunu ileri sürmektedir. Birçok kişinin bir dizi aday arasından göreceli olarak en iyisini seçme olasılığını maksimize etmek olan sekreter probleminin çözüldüğünün açık bir şekilde ortada olduğunu söylemiş fakat bunun gerçekte Googol Oyunu’nda sunulan problem olmadığına işaret etmiştir. İlk olarak

Googol oyuncusu her kâğıt parçasındaki değerlerin ne olduğunu bilmektedir. İkinci olarak bu rekabetçi bir yarışmadır. Oyunculardan biri diğerini kandıracak değerleri ve bunların sırasını belirlemeye çalışmaktadır. Ferguson'un daha zorlu olan bu problem için bir çözümü vardır ama bu konudaki makalesi sizin okumanızı gerektirecek kadar karmaşıktır.

23 Mosteller problemi 1955 senesinde meslektaşı Andrew Gleason'dan duyduğunu hatırlamaktadır: Gilbert ve Mosteller, "Recognizing the Maximum of a Sequence."

23 Rutgers'dan Roger Pinkham: Roger Pinkham'dan Martin Gardner'a Mektup, 29 Ocak 1960.

24 Flood'un bilgisayar bilimine olan etkisi: Bkz Cook, "In Pursuit of the Traveling Salesman"; Poundstone, "Prisoner's Dilemma"; Flood, "So News."

24 problemle 1949 senesinden itibaren: Flood bu iddiayı Gardner'a 5 Mayıs 1960 tarihinde yazmış olduğu bir mektupta dile getirmiştir. Andrew Gleason, David Blackwell ve Herbert Robbins'in problemi daha önceki senelerde çözmüş olduklarına dair dedikoduları belirtse de doğru çözümü içeren 5 Mayıs 1958 tarihli bir mektubu, bu mektubun içine koymuştur.

Flood 12 Mayıs 1988 tarihinde Tom Ferguson'a yazdığı bir mektupta problemin kaynağı hakkında daha fazla detaylara inmektedir. (Mektubun aslı Michigan Üniversitesi'ndeki Merrill Flood arşivindedir.) Liseden henüz mezun olmuş kızı kendisinden daha yaşlı bir adamla ciddi bir ilişkiye girmişti ve Flood ile eşi bu ilişkiye onay vermemişlerdi. Kızı George Washington Üniversitesi'nde Ocak 1950'de bir konferansta vakit geçirmektedirken Flood "nişanlı problemi" adını taktığı problemi burada sunmuştur. Bu konuyu kendi kelimeleriyle şu şekilde anlatmaktadır: "O zaman problemi çözmek için herhangi bir girişimde bulunmadım. Bunu onun üzerine kafa yorabileceği bir şey olması umuduyla sundum." Flood, kendisi tam bir çözüm bulmadan daha önce Herbert Robbins'in bu probleme yaklaşık bir çözüm bulduğunu belirtmektedir.

25 1964 yılındaki bir yazıyla: Chow ve diğerleri, "Optimal Selection Based on Relative Rank."

25 "o ana kadarki en iyi": Literatürde "o ana kadar ki en iyi" başvurularına (biraz kafa karıştırıcı bir şekilde) "aday" denmektedir.

- 27 **havuzun yüzde 37'si**: Yüzde 37 Kuralı n başvuran kişi üzerinde aynı analiz uygulanarak (en iyi adayı seçmede, ilk k adet başvuran kişinin sonuçlarına dayanarak bir standart oluşturma olasılığına ulaşma çalışması) çıkarılmıştır. Bu olasılık k 'nın n 'ye oranı şeklinde (p olarak gösterilebilir) ifade edilebilir. n büyüdükçe en iyi adayı seçme olasılığı matematiksel $p \log p$ fonksiyonuna yakınsar. Bu fonksiyon $p=1/e$ değerinde maksimum değerini alır. e 'nin değeri 2,71828...dir, bu nedenle de $1/e$ değeri 0,367879441... değerine ya da diğer bir deyişle yüzde 37'nin çok az altındaki bir değere eşittir. Başarı olasılığı p 'ye eşit olduğu için $\log e$ 'nin 1'e eşit olmasıyla matematiksel bir rastlantı ortaya çıkmaktadır. Bu değerlerin elde edilmesinin tam açıklaması, Ferguson'un "Who Solved the Secretary Problem?" çalışmasında yer almaktadır.
- 27 **merak uyandırıcı simetrilere biridir**: Matematikçi John Gilbert ile Frederick Mosteller, bu simetriyi "heyecan verici" olarak adlandırmakta ve "Recognizing the Maximum of a Sequence" adlı çalışmalarında daha detaylı olarak ele almaktadırlar.
- 29 **"Cinsiyetler arasındaki tutku"**: Malthus, An Essay on the Principle of Population.
- 29 **"İlk öpüştüğüm adamla evlendim"**: Thomas, Front Row at the White House gibi pek çok kaynakta yer almaktadır.
- 29 **aşkı arayan bir gençti**: Michael Trick'in eşiyle tanışması hakkındaki blog paylaşımı, "Finding Love Optimally," *Michael Trick's Operations Research Blog*, 27 Şubat 2011, <http://mat.tepper.cmu.edu/blog/?p=1392>.
- 29 **aday sayısına uygulanabildiği gibi araştırma için planlanan süreye**: Yüzde 37 Kuralı, sadece adaylar zaman içerisinde dağılmakta ise doğrudan arama süresine uygulanabilmektedir. Diğer durumda zaman içerisinde yüzde 37'lik dağılımı hedeflemelisiniz. Fazlası için bkz. Bruss, "A Unified Approach to a Class of Best Choice Problems."
- 29 **Yüzde 37 Kuralı araştırma yapmaktan seçim yapmaya geçeceği zamanın 26,1 yaş olduğunu söylemekteydi**: Evlenme teklif etmek için en azından 26 yaşına kadar beklemenin analizi (18 ila 40 yaş arasının yüzde 37'si) ilk olarak Lindley'nin "Dynamic Programming and Decision Theory" eserinde görülmektedir ve Trick de muhtemelen bu fikirle burada karşılaşmıştır.

- 30 **Toplamda 11 kişiyle tanıştıktan sonra:** Kepler'in bu hikâyesinden detaylı olarak şuralarda bahsedilmektedir: Koestler, *The Water-shed*, Baumgardt, *Johannes Kepler*, ve Connor, *Kepler's Witch*. Kepler'in ikinci eşini araması hakkında bildiklerimizin çoğu özellikle Kepler'in Avusturya, Linz'deki bilinmeyen asil bir beye 23 Ekim 1613 tarihinde yazmış olduğu bir mektuptan gelmektedir.
- 31 **erkenden ve sık bir şekilde teklifte bulunmak:** Smith'in "A Secretary Problem with Uncertain Employment" eseri bir teklifin reddedilme olasılığı q ise en iyi adayı bulma olasılığını maksimize eden stratejinin, $q^{1/(1-q)}$ 'ye eşit aday bölümüne bakmak ve daha sonra o ana kadar görülenlerden daha iyi olan bir adaya teklif etmek olduğunu göstermektedir. Bu oran her zaman $1/e$ 'den küçüktür. Bu nedenle daha fazla teklifte bulunarak şansınızı artırmaktasınız. Ne yazık ki bu şanslar eğer reddedilmeyorsanız hâlen kötüdür. En iyi adayı bulma şansınız da $q^{1/(1-q)}$ 'ye eşittir ve bu nedenle eldeki Yüzde 37 Kuralından daha küçüktür.
- 32 **adayların yüzde 61'ini görene kadar:** Eğer geçmiş adaylara teklif edilmesine izin verilirse, optimal strateji yapılan erken bir teklifin kabul edilme olasılığına (q 'ya) ve geri dönülen bir adaya yapılan bir teklifin başarılı olma olasılığına (p 'ye) bağlı olur. İlk olarak görülen adayların formülü $[q^2/(q-p(1-q))]^{1/(1-q)}$ ile gösterilir. Bu entegre formül Petruccelli'nin "Best-Choice Problems Involving Uncertainty" çalışmasından gelir fakat eski adayları yeniden değerlendirmeye daha önceki şu çalışmada rastlanabilir: Yang, "Recognizing the Maximum of a Random Sequence."

Bu formül q ve p için belirli tercihlerde bulunduğumuzda işleri kolaylaştırmaktadır. Eğer $p=0$ ise eski adaylara yapılan teklifler her zaman reddedilmektedir ve elimizdeki soru yine eski adaylara dönüş olmayan sekreter problemidir. $q=1$ değerine yaklaştığımızda, yani teklifler hemen hemen derhâl kabul edildiğinde teklife başlamadan önce arama yapılacak olan oran e^{p-1} e doğru yaklaşır ve bu değer her zaman $1/e$ 'den büyüktür. Genel olarak adaylarla ilk defada yapılan tekliflerin her zaman kabul edildiğini ($q=1$) ancak geriye dönülerek yapılan tekliflerin yarısının kabul edildiğini ($p=0,5$) varsayınız. O zaman adayların yüzde 61'ini incelemeli ve arkadan gelen en iyi adaya teklifte bulunmalısınız.

Petrucelli tarafından ele alınan bir diğer olasılık reddedilme olasılığının zaman geçtikçe, adayların şevki azalacağından artmasıdır. Bir aday tarafından bir teklifin kabul edilme olasılığı qp^s ise ve s adayı yeniden bulmak için geriye doğru gidilmesi için gerekli adım sayısını gösterir ise o zaman optimal strateji q , p ve aday sayısı olan n 'ye dayanır. Eğer $q/(1-p)$ değeri $(n-1)$ den daha büyük ise o zaman bir bekleme oyunu oynamak ve tüm adayları gözlemleyip en iyisine teklif etmek en iyisidir. Ya da $q^{1/(1-q)}$ kadarlık bir kesimi gözlemleyin, daha sonra o ana kadarkilerden daha iyi olan birine teklif edin. Bu strateji ilginç bir şekilde $p=0$ olduğu durumdaki stratejiyle tam olarak aynı stratejidir ve eğer reddedilme olasılığı zaman geçtikçe artarsa, eski bir adaya geri dönmek bir anlamı olmadığı anlamına gelir.

33 “Bir standart belirlemek için herhangi bir tecrübe birikimine gerek yoktur...”: Gilbert ve Mosteller, “Recognizing the Maximum of a Sequence.”

34 Eşik Değer Kuralını (Threshold Rule) kullanabiliriz: Tam bilgi sahibi olunan oyunlar gibi optimal duraklama problemlerini çözmedeki genel strateji sondan başlamak ve başa doğru akıl yürütmektir. Bu prensibe geriye doğru (gerisel) tümevarım denir. Örneğin, bir zar attığınız ve gelen sayıyla devam etme ya da en fazla k sefer daha zar atma seçeneğine sahip olduğunuz bir oyun hayal edin (bu örneği Hill'in “Knowing When to Stop” eserinden almaktayız). Optimal strateji nedir? Bunu, geriye doğru çalışırsak bulabiliriz. Eğer $k=0$ ise bir seçeneğiniz yok demektir. Gelen sayıya razı gelirseniz ve ortalama 3,5 $[(1+2+3+4+5+6)/6]$ puan alırsınız. Eğer $k=1$ ise sadece ortalamanın üzerinde bir sayı gelirse bu sayıda karar kılmalısınız. Yani, dört ya da daha fazla bir sayı. Eğer bir, iki ya da üç gelirse son bir kez daha zar atma şansını kullanmanız daha iyi olur. Bu stratejiyi izlerseniz, yüzde 50 ihtimalle dört, beş ya da altıda durabilir (yani ortalama beş) ve yüzde 50 ihtimalle ikinci zar atışına geçip ortalama 3,5 elde edersiniz. Bu nedenle $k=1$ olduğunda ortalama puanınız 4,25'tir ve $k=2$ değerinde sadece beş ya da daha fazla bir değer gelirse bu değere sadık kalmanız gerekir. Bu durum böylece devam eder.

Geriye doğru tümevarım bu şekilde eski bir soruya yanıt vermektedir. “Eldeki bir kuş, daldaki ikiden daha yeğdir” deriz ama 2.0 burada doğru katsayı mıdır acaba? Matematiğe göre daldaki kuşların doğru sayısı aslında eldeki kuşun kalitesine bağlıdır. Daha kolay anlaşıl-

ması açısından kuşları zarlarla değiştirecek olursak gelecek olan bir, iki ya da üç, eldeki tek zar atışı kadar değerli olmayacaktır. Lakin dört değerli olacaktır, hatta beş gelmesi durumu ise iki, üç hatta dört zar atış hakkına değer olur. Zar altı gelmişse daldaki sonsuz sayıdaki atış hakkından daha değerli olacaktır.

Gilbert ile Mosteller, tam bilgi sahibi olunan bir sekreter probleminde kullanılması gereken eşik değerlerine ulaşmak için aynı yaklaşımı kullandılar. Eşik değerleri tek basit matematik formülüyle tanımlanmamıştır ama yazarların çalışmasında bazı yakınsamalar yer almaktadır. En basit yakınsama, $n-k$ 'inci aday için şu eşik değerini vermektedir: $t_k = 1 / (1 + 0.804/k + 0.183/k^2)$. Eğer herhangi bir adayın $n-k$ 'inci adaydan daha iyi olma ihtimali t_k dan küçük ise, o zaman o adayı seçmelisiniz. k artıkça değer de artacağından zaman içerisinde siz de eşik değerinizi düşürmelisiniz.

- 36 **Sekreter probleminin başka varsayımlara dayalı pek çok çeşidi mevcuttur:** Freeman'ın "The Secretary Problem and Its Extensions" çalışması sekreter problemlerinin büyük kısmını özetlemektedir. Elde edilen faydalı sonuçlardan bazılarını içeren kısa bir özet aşağıda yer almaktadır.

Eğer adayların sayısı birden n 'e kadar eşit olasılıklı olarak herhangi bir sayı olabiliyor ise optimal kural, ilk n/e^2 adayı gözlemlemek ve daha sonra gelecek olan o ana kadarkilerden daha iyi ilk adayı seçmektir ve bunun başarı oranı $2/e^2$ 'dir. Bkz. (Presman and Sonin, "The Best Choice Problem for a Random Number of Objects"). Eğer adayların sayısı sonsuz ve araştırma, p olasılığı ile her adaydan sonra sonlanıyor ise optimal kural, ilk $0,18/p$ adayı gözlemlemek ve ardından yüzde 23,6 başarı olasılığıyla seçim yapmaktır (a.g.e.).

En iyi sekreteri bulmayı istediğinizi ve bunu yapmanın değerinin siz araştırmaya devam ettikçe azaldığını hayal edin. Eğer k adayla görüştükten sonra en iyi sekreteri bulmanın getirisi d^k ise, beklenen getiriyi maksimize eden strateji $1/(1-d)$ 'den daha az aday olması koşuluyla belirli bir aday sayısına dayanan bir eşik değeri belirlemektir. Bkz. (Rasmussen and Pliska, "Choosing the Maximum"). Eğer d 1'e yakınsa, o zaman optimal strateji, ilk $0,4348/\log d$ adaya bakmak ve sonra bunların en iyisinden daha iyi olan ilk adayı seçmek olur. Bu stratejiyi izlemek, aday havuzunun büyüklüğünden bağımsız bir şekilde sadece bir avuç adayı gözlemlemekle sonuçlanabilir.

Gerçek yaşamın ideal işe alma senaryolarından ayrıldığı bir nokta, amacın en iyi sekreteri işe alma olasılığını maksimize etmek olmaya-bileceğidir. Bunun dışında bir dizi amaç daha geliştirilmiştir. Chow ve arkadaşlarının “Optimal Selection Based on Relative Rank” çalışması eğer amaç seçilen adayın ortalama olarak havuz içindeki sıralamasını maksimize etmekse, farklı bir yaklaşımın geçerli olacağını göstermiştir. Adayın göreceli sıralamasına dayalı tek bir eşik değerinden ziyade bir dizi eşik değeri birlikte kullanmışlardır. Bu eşikler gözlenen aday sayısı arttıkça ve görüşmeleri yapan kişi zaman içinde daha gevşek bir hâl aldıkça artar. Örneğin, dört adayın olduğu durumda aramayı durdurmak için bir adayın sahip olması gereken göreceli sıralama derecesi ilk aday için 0 (yani, ilk adayda araştırmayı asla durdurma), ikinci aday için 1 (yani, sadece birinciden iyi ise dur), üçüncü için 2 (eğer en iyi ya da ikinci en iyi ise dur) ve dördüncü için 4’tür (dur artık!). Bu stratejiyi izlemenin ortalama beklenen sıralama değeri 1 tam $7/8$ ’dir ve rastgele bir aday seçmenin değeri ise $(1+2+3+4)/4 = 2$ tam $1/2$ ’dir. Optimal eşik değer için olan formül geriye doğru çıkarımla elde edilmiştir ve karmaşıktır. Konu ile ilgilenen kişilerin çalışmaya bakmaları daha faydalı olacaktır.

Klasik sekreter problemi ile ortalama sıralama değerini esas alan problem arasındaki farkı, farklı sıralama değerine sahip adaylara getirileri nasıl tahsis ettikleri açısından düşünebilirsiniz. Klasik problemde en iyiyi seçme durumunda 1, diğer adayları seçme durumunda ise 0 getirisinin sahibi olursunuz. Ortalama sıralama değeri türünde ise aday sayısından seçilen adayın sıra değerinin çıkarılması sonucu elde kalan kadar getiri sahibi olursunuz. Bunu genellemenin basit yolları mevcuttur ve ortalama sıralama değerini maksimize eden çok eşik değerine sahip stratejiler, adayın sıralama değeri büyüdükçe getirisi azalan tüm fonksiyonlar için işe yaramaktadır. Bkz. Mucci, “On a Class of Secretary Problems”. Bir başka ilgi çekici genelleme-sevgililerle ilgili önemli uygulamalara sahip- en iyiyi seçmenin getirisinin 1, diğer herhangi birini seçmenin getirisinin ise -1 olduğu (hiçbir seçim yapılmadığı durumda getiri 0’dır) durumdur ve burada adayların $1/(e)^{1/2} =$ yaklaşık yüzde 60,7’sini incelemek ve sonra o ana kadarkilerin en iyisi olanı seçmek (kimse bu kritere uymuyorsa da seçmemek) optimal kuraldır. Bkz. Sakaguchi, “Bilateral Sequential

Games". Yani, karar vermeden önce getiri fonksiyonunuz üzerinde iyice kafa yorunuz.

Peki, ya sadece en iyi kişiyi bulmayı değil de bununla birlikte elinizdeki zamanı da göz önüne alıyorsanız? Ferguson, Hardwick ve Tamaki "Maximizing the Duration of Owning a Relatively Best Object" isimli çalışmalarında bu problemin çeşitli türlerini ele almışlardır. Eğer sadece n kişiden oluşan kümedeki en iyi adayla geçirdiğiniz zamanı maksimize etmeyi amaçlıyorsanız, ilk $0,204n + 1,33$ kişiye bakmalı ve daha sonra da bunlardan daha iyi olan ilk kişiyi seçmelisiniz. Fakat eğer o ana kadar baktıklarınız içindekilerden en iyisiyle maksimum zaman geçirmeyi amaçlıyorsanız bu sefer $1/e^2 =$ yaklaşık yüzde 13,5'lik kesime bakmanız gerekir. Daha kısa olan bu inceleme periyotları özellikle kişilerin randevulaşmalarıyla ilgilidir. Burada bir eş arayışı yaşamınızın belirli bir sürecini kapsar.

En iyi kişiyi bulmaktansa ikinci en iyi kişiyi bulmanın daha zor olduğu ortaya çıkmıştır. Burada optimal strateji adayların ilk yarısını incelemek, sonra da o ana kadar görüşülenlere nazaran ikinci en iyi adayı seçmektir. Bkz. Rose, "A Problem of Optimal Choice and Assignment". Burada başarı oranı sadece $1/4$ 'tür (en iyi için olan ihtimal ise $1/e$ 'dir).

Son olarak, bir sekreter ararken görüştüğünüz adayların aynı zamanda başka iş aradıklarını göz önüne alan sekreter problem türleri de mevcuttur. İlave edilen bu simetri problemi daha da karmaşık kılmaktadır. Indiana Üniversitesi'nden bilişsel bilim uzmanı Peter Todd, bu karmaşıklığı (ve nasıl basitleştirileceğini) detaylı bir şekilde incelemiştir. Fazlası için bkz. Todd ve Miller, "From Pride and Prejudice to Persuasion Satisficing in Mate Search,"; Todd, "Coevolved Cognitive Mechanisms in Mate Search."

36 Bir evi satmak, tam bilgili senaryoya benzemektedir: Ev satma problemi, Sakaguchi, "Dynamic Programming of Some Sequential Sampling Design"; Chow ve Robbins, "A Martingale System Theorem and Applications"; Chow ve Robbins, "On Optimal Stopping Rules" çalışmalarında analiz edilmiştir. Biz muhtemelen sonsuz sayıda teklifin olduğu duruma odaklanmaktayız fakat adı geçen yazarlar buna ilave olarak teklif sayısının bilindiği ve sınırlı sayıda olduğu durumlar için de (daha az muhafazakâr olan, sadece sınırlı sayıda fırsatınız olduğu için düşük bir eşik değerine sahip olmanız gereken) optimal stratejiler

sunmaktadır. Sonsuz teklifin olduğu durumlarda bir diğer teklifi beklemenin beklenen değerine dayalı olarak bir eşik belirlemeli ve bu eşik değerini aşan ilk teklifi kabul etmelisiniz.

37 duraklama fiyatının fonksiyonu: Hem teklif fiyatı olan p hem de bir başka teklifi beklemenin maliyeti olan c 'yi fiyat aralığımızın bölümleri olarak ifade ederken (0 en alt, 1 de en üst değer olacak şekilde) bir sonraki teklifin p 'den daha iyi olma olasılığı oldukça basit bir şekilde sadece $1-p$ 'dir. Eğer daha iyi bir teklif gelirse (ya da daha iyi bir teklif geldiğinde), p 'ye nazaran kazanmayı beklediğimiz ortalama miktar sadece $(1-p)/2$ olur. Bu değerlerin çarpımı bize bir diğer teklifi değerlendirmenin beklenen sonucunu verir ve bu da kabule değer olması açısından c maliyetine eşit ya da daha büyük olmalıdır. Bu denklem $(1-p)[(1-p)/2] \geq c$ $1/2(1-p)^2 \geq c$ şeklinde sadeleştirilebilir ve bunun p için çözümü de bize 38'nci sayfadaki tabloda yer alan $p \geq 1 - (2c)^{1/2}$ değerini verir.

39 “İlk gelen teklif şahaneydi...”: Laura Albert McLay, röportaj, 16 Ekim 2014.

39 insanların nasıl iş aramaları gerektiğini modellemek: İş aramayı bir optimal duraklama problemi olarak düşünme konusuyla Stigler “The Economics of Information” ve “Information in the Labor Market” isimli çalışmalarında çalışmıştır. McCall’un “Economics of Information and Job Search” çalışması ev satma problemine çok benzer bir model önerdi ve Lippman ve McCall “The Economics of Job Search” isimli çalışmalarında bu modelin çeşitli uzanımlarını ele almışlardır. Tıpkı sekreter probleminin birçok türev probleme esin kaynağı olması gibi burada da ekonomistler, bu basit modeli daha gerçekçi olacak şekilde geliştirmişlerdir: Aynı gün içerisinde birden çok teklifin gelmesine izin verecek şekilde modele izin vermek, satıcı için maliyetler ile oynanmasına izin vermek ve araştırma sırasındaki ekonomik dalgalanmanın probleme dâhil edilmesini sağlamak. İş arama konusundaki optimal duraklama problemlerinin iyi bir incelemesi Rogerson, Shimer ve Wright’ın “Search: Theoretic Models of the Labor Market” isimli çalışmada bulunabilir.

39 Eğer daha önce eşik değerinizin üzerinde değilse, şimdi de olmayacaktır: İş arama üzerine bir araştırmada da belirtildiği gibi, “Daha önce geri çevrilmiş olan tekliflere geri dönülemeyeceğini varsayın; bu durum aslında problem durağan olduğu için bir kısıt teşkil etmese

bile. Bu nedenle bugün kabul edilemez olan bir teklif, yarın da kabul edilemez olacaktır (a.g.e.).”

- 40 **akademisyen personel için de otomobil park yeri:** Clark Kerr, “Education: View from the Bridge,” *Time*, 17 Kasım 1958.
- 40 **sanırım beklenen trafiğe göre de planlama yapmalısınız:** Donald Shoup ile kişisel yazışmalar, Haziran 2013.
- 42 **San Francisco şehir merkezinde yürürlüktedir:** SFMTA tarafından geliştirilen SFpark sistemine ve Shoup’tan esinlenen dinamik park sistemine dair daha fazla bilgi <http://sfpark.org/how-it-works/pricing/> adresinde bulunabilir. (Bu sayfada Shoup danışmandır). Bu program 2011’de uygulamaya konuldu ve dünyada kendi türünün ilki olan bir projedir. Programın etkilerine yönelik yakın zamanda yapılmış bir analiz için bakınız Millard-Ball, Weinberger ve Hampshire, “Is the Curb 80% Full or 20% Empty?”
- 42 **doluluk oranı yüzde 90’dan yüzde 95’e yükseldiğinde:** Donald Shoup, kişisel yazışmalar, 7 Haziran 2013. Daha kesin olmak gerekirse, doluluk oranında yüzde 90’dan yüzde 95’e doğru olan bir artış aslında yüzde 5,5555...’lik bir artışı göstermektedir.
- 42 **Park yerlerinin düzgün bir şekilde dağılmış olduğu sonsuz uzunlukta bir yolda olduğunuzu:** Temel park yeri problemi, burada da belirtildiği gibi DeGroot’un “Optimal Statistical Decisions” isimli çalışmasında bir problem olarak belirtilmiştir. Çözüm, varış noktasından $-\log_2/\log(1-p)$ önceki noktadan daha erken olan boş bir yere aracı park etmektir. Burada p herhangi bir park yerinin boş olma ihtimalini göstermektedir.
- 43 **ciddi bir şekilde yer aramak zorunda kalmazsınız:** Shoup’un The High Cost of Free Parking eserinin 17’nci bölümü, blok başına ortalama bir boş yer yarattığı durumda optimal sokak üzeri park etme stratejisini ele almaktadır ve Shoup “problem açgözlülük ile üşengeçlik arasındaki çatışmaya dayanır” demektedir (kişisel yazışmalar). Ucuz sokak üstü park yerleri için arabayla gezinmek ya da özel park yerleri için ücret ödemek sorusu Shoup’un çalışmasının 13’üncü bölümündedir.
- 43 **bu temel senaryo üzerinde çeşitli değişiklikler:** Tamaki’nin “Adaptive Approach to Some Stopping Problems” çalışması bir noktanın boş olma olasılığının konumuna bağlı olduğunu öne sürmüş ve bu olasılıkların hareket hâlinde nasıl hesaplanabileceğini ele almıştır.

Tamaki'nin "Optimal Stopping in the Parking Problem with U-Turn" çalışması ise U dönüşü olasılıklarını probleme eklemiştir. Tamaki'nin "An Optimal Parking Problem" DeGroot'un modeline park imkânları'nın ayırık bir nokta kümesi olarak ele alınmadığı bir uzantı olarak ele almıştır. Sakaguchi ile Tamaki'nin "On the Optimal Parking Problem in Which Spaces Appear Randomly" çalışması bu sürekli formülü kullanmış ve varış noktasının bilinmemesi durumunu mümkün kılmıştır. Mac-Queen ve Miller'ın "Optimal Persistence Policies" çalışması bunlardan ayrı olarak araçların bloğun etrafında dolaşmasına imkân tanıyarak problemi sürekli bir hâlde incelemiştir.

- 44 **"Bisiklet kullanıyorum"**: Donald Shoup, kişisel görüşme, 7 Haziran 2013.
- 44 **Forbes dergisi Boris Berezovsky'yi üç milyar dolar civarı varlığıyla:** Forbes, "World's Billionaires", 28 Temmuz 1997, sf. 174.
- 44 **Yeni bir oligarşi sınıfının üyesi olarak:** Paul Klebnikov, "The Rise of an Oligarch", *Forbes*, 9 Eylül 2000.
- 45 **Devletin bir sopası vardır; sadece bir kez kullanır ve tam kafaya vurur:** Vladimir Putin, Fransız gazetesi *Le Figaro* ile olan röportajından, 26 Ekim 2000.
- 45 **kitabı tamamen sekreter problemi üzerineydi:** Berezovsky ve Gnedin, "Problems of Best Choice".
- 45 **çeşitli isim ve şekiller altında çalışmalar yapılmıştır:** Önde olduğunuzda bırakma problemine yaklaşmanın çeşitli yolları mevcuttur. Bunlardan ilki kazanma dizisinin uzunluğunu maksimize etmektir. Diyelim ki yazı gelme ihtimali p olan bir atış yapıyorsunuz. Her bir atış için c dolar ödüyorsunuz ve yazı geldiği her seferinde bir dolar alıyor, tura geldiğinde ise tüm kazanım toplamınızı kaybediyorsunuz. Bu para atışını ne zaman bırakmalısınız? Bu sorunun cevabı, Norman Starr tarafından 1972'de gösterildiği gibi, r defa yazı geldikten sonra bırakmaktır. r burada $p^{r+1} \leq c$ 'yi sağlayan en küçük sayıdır. Yani, eğer sıradan bir para atışında olduğu gibi $p=1/2$ ise ve her para atışı size 0,10 dolara mal olmaktaysa o zaman ardı ardına dört kez yazı geldiği zaman oyunu bırakmalısınız. Bu dizinin analizi Starr'ın "How to Win a War if You Must" çalışmasında, bir savaşı kazanma modeli olarak sunulduğu şekliyle mevcuttur. Daha detaylı bir çalışma Ferguson'un "Stopping a Sum During a Success Run" isimli çalışmasında mevcuttur.

Yazı gelen bir serinin uzunluğunu maksimize etmek bazı işletme durumları için iyi bir örnek olmaktadır. Anlaşmaya varılması c maliyetine, işe yarama olasılığı p ve başarı durumunda d getirisi olan, başarısızlıkta ise gelirlerin tamamını götüren bir dizi anlaşma için $p^{r/d+1} \leq c/d$ kadar dolar elde edildikten sonra oyun bırakılmalıdır. Aşırı derecede hırslı uyuşturucu satıcıları, bu çalışmaya bir bakın.

Kitapta ele alınmış olan hırsız probleminde her soygundan elde edilen ganimetin m ve bu soygundan yakalanmadan sıyrılma olasılığının q olduğunu varsayın. Ancak eğer $1-q$ olasılık gerçekleşip hırsız yakalandığında, her şeyini kaybetmektedir. Çözüm; $mq/(1-q)$ kadarlık bir ganimet elde ettiğinizde işi bırakın. Hırsız problemi, Haggstrom'un "Optimal Sequential Procedures When More Than One Stop Is Required" çalışmasında hırsızın ayrıca hangi şehre taşınmaya karar vermeye çalıştığı, daha karmaşık bir problemin bir parçası olarak yer almaktadır.

- 46 **Berkshire'daki evinin banyosunda bir iple asılmış olarak koruması tarafından bulundu:** Bkz. "Boris Berezovsky 'Found with Ligature Around His Neck,' " *BBC News*, 28 Mart 2013, <http://www.bbc.com/news/uk-21963080>.
- 46 **Ölümü sonrasında yapılan incelemenin resmi sonuçlarına göre:** Bkz. Reuters, "Berezovsky Death Consistent with Hanging: Police" 25 Mart 2013, <http://www.reuters.com/article/2013/03/25/us-britain-russia-berezovsky-postmortem-idUSBRE92O12320130325>.
- 46 **Berezovsky vazgeçmeyecekti:** Hoffman, "The Oligarchs", sf. 128.
- 47 **herhangi bir optimal duraklama çözümüne sahip değildir:** Bir optimal duraklama kuralının var olması için gerekli şartlardan biri, mümkün olan en iyi noktada durmanın karşılığının sınırlı bir değer olmasıdır. (Bkz. Ferguson, "Optimal Stopping and Applications"). "Üç katı ya da hiç" oyunu bu durumun aksine bir durum yaratmaktadır. Eğer yazı, ardından tura gelecek şekilde k defa gelirse, o zaman mümkün olan en iyi senaryoya göre bir oyuncu tura gelmeden önce durarak 3^k-1 kazanır. Bunun gerçekleşme olasılığı $1/2^{k+1}$ 'dir. Bu nedenle de k 'nin ortalaması sonsuzdur.

Eğer bu durumun çözümünü, insanların daha fazla para sahibi oldukça paraya daha az değer vereceklerini düşünerek gerçekleştireceğini varsayıyorsanız (üç katına çıkan para değerinin insanların o miktara bağladıkları faydayı üç katına çıkarmayabilecekleri gibi) bunun

etrafından dolaşabileceğiniz bir yol mevcuttur: Fayda değerlerini üç katına çıkaracak ödüller öneren ancak optimal bir duraklama kuralı olmayan bir oyun. Örneğin, eğer paraya atadığınız fayda değer fonksiyonu paranın miktarının logaritmik bir fonksiyonu olarak artarsa o zaman oyun “üçüncü dereceden kuvveti ya da hiç” hâlini alır.

“Üç katı ya da hiç” oyununun, tüm servetiniz tehlike altında olmasına karşın ilginç bir şekilde optimal duraklama kuralı olmamasına karşın, bu tarz oyunları oynamak için güzel stratejiler mevcuttur. J. L. Kelly Jr.’dan adını alan ve ilk olarak Kelly’nin “A New Interpretation of Information Rate” çalışmasında anlatılan Kelly kumar planı bu örneklerden biridir. Burada bir oyuncu, p olasılığı ile her seferinde ilk yatırılan paranın $p+1$ katını kazandıran bir oyunun her turunda elindeki paranın $[p(b+1)-1]/b$ kadarını her seferinde oynayarak getiri oranını maksimize edebilir. Üç katı ya da hiç örneğimiz için, $b=2$ ve $p=0,5$ ise her seferinde elimizdeki paranın çeyreğini oynamalıyız; kaçınılmaz bir şekilde iflasa götürecek şekilde hepsini değil. Kelly’nin bu kumar planına dair daha fazla bilgi Poundstone’un “Fortune’s Formula” isimli çalışmada bulunmaktadır.

- 47 **Bu dünyadan sadece bir kere geçmeyi bekliyorum:** Bu sözün sahibi kesin olarak belli olmamakla birlikte 19’uncu yüzyılın ikinci yarısından itibaren Quaker’in deyişi olarak alıntılanmıştır ve en azından 1893’ten bu yana Grellet ile ilişkilendirilmiştir. Daha fazlası için bkz. W. Gurney Benham, “Benham’s Book of Quotations, Proverbs, and Household Words”, 1907.
- 47 **Öğleden sonralarınızı harcayın gitsin:** Dillard, “Pilgrim at Tinker Creek”.
- 48 **Klasik sekreter problemine en yakın:** Seale ve Rapoport, “Sequential Decision Making with Relative Ranks”.
- 48 **daha önce seçim yapmışlardı:** a.g.e. İnsanların araştırma yapmaktan seçim yapmaya geçtikleri nokta genelde 40 adaydan 12’ncisi, 80 adaydan 21’incisi ya da yüzdesel olarak ifade etmek gerekirse sırasıyla yüzde 32 ve yüzde 26’ydı.
- 48 **“Yapım gereği çok sabırsız olmama...”:** Amnon Rapoport, 11 Haziran 2013 tarihli görüşmeden.
- 49 **Seale ve Rapoport, ...göstermişlerdir:** Seale ve Rapoport, “Sequential Decision Making with Relative Ranks”.

49 **“Canımızın sıkılması mantıksız değildir ama...”**: Neil Bearden ile karşılıklı yazışmalardan, 26 Haziran 2013. Ayrıca bkz. Bearden, “A New Secretary Problem”.

49 **Çünkü zamanın akışı tüm karar verme eylemlerini bir optimal duraklama problemine dönüştürür**: Bu tarz bir argüman ilk olarak Herbert Simon tarafından yapılmıştı ve Nobel Ödülü kazanmasını sağlayan bilime katkı hususlarından biriydi. Simon parlak kariyerine, siyaset bilimci olarak idarenin yönetimi hakkında pek de parlak olmayan bir yazı kaleme alarak başlamıştı. Organizasyonların karar veren gerçek kişilerden nasıl oluştuğu konusunu anlama problemine daha fazla daldıkça matematiksel ekonomi tarafından karar verme için öne sürülen soyut modellere (rasyonel bir eylemin tüm seçeneklerin çok yorucu bir şekilde göz önüne alınmasını gerektirdiğini iddia eden modeller) karşı olan tatminsizliği arttı.

Simon’ın organizasyonlarda kararların nasıl alındığını araştırması bu varsayımların yanlış olduğunu anlamasına yardımcı oldu. Bir alternatif gerekliydi. “A Behavioral Model of Rational Choice” çalışmasında şu şekilde açıklama yapmıştı: “Buradaki iş, bir ekonomistin küresel rasyonelliğini bilgi ve işlem gücüyle uyumlu olacak bir davranışla değiştirmektir.”

Simon’ın daha gerçekçi insan seçimi olarak önerdiği türden bir çözüm -tatmin edici olarak adlandırdığı- tatmin olunacak eşik belirlenir, “yeteri kadar iyi” bir çıktı alır ve daha sonra da bu eşğin üstüne çıkan ilk seçeneği tercih etmek için tecrübelerden istifade eder. Bu algoritmanın burada daha önce ele aldığımız optimal duraklama problemlerinin çözümleriyle aynı karaktere sahiptir. Burada eşik değer ya değer aralıklarını anlamak adına bir süre geçirerek (sekreter probleminde olduğu gibi) ya da farklı sonuçlarının olasılıklarını bilme durumuna dayalı olarak belirlenir. Aslında Simon’ın argümanlarında kullandığı örneklerden biri, burada sunulan örneklere benzer bir şekilde bir evi satmaktır.

49 **optimal duraklama üzerine olan bir ders kitabı**: Ferguson, “Optimal Stopping and Applications”.

2. Araştır/Kullan (Explore/Exploit)

- 52 **“Yeni arkadaşlar edinin”**: Joseph Parry, “New Friends and Old Friends”; *The Best Loved Poems of the American People*, Hazel Felleman (Garden City, NY: Doubleday, 1936), sf. 58.
- 52 **“Hiçbir yaşam o kadar zengin ya da eşsiz değildir”**: Helen Steiner Rice, “The Garden of Friendship,” *The Poems and Prayers of Helen Steiner Rice*, Virginia J. Ruehlmann (Grand Rapids, MI: Fleming H. Revell), sf. 47.
- 53 **“...kendinize bir yer bulmaya çalışırsınız.”**: Scott Plagenhoef, kişisel görüşmelerden, 5 Eylül 2013.
- 54 **Bu garip isim, ...gelmektedir**: Merrill Flood’a 14 Nisan 1955 tarihinde yazılmış bir mektupta (Michigan Üniversitesi’ndeki Merrill Flood arşivinde bulabilirsiniz) Frederick Mosteller, ismin kaynağının hikâyesini anlatmaktadır. Mosteller ve ortağı Robert Bush öğrenmenin matematiksel modelleri (Tom’un bugünlerde yapmakta olduğu araştırmayla aynı konuya sahiptir ve günümüzde matematiksel psikoloji olarak bilinen olgunun ilk örneklerinden biridir) üzerinde çalışmaktaydı. Özellikle hayvanların T harfinin tabanına yerleştirildiği ve daha sonra sola ya da sağa gitme kararı verme zorunda kaldıkları T şeklindeki bir labirentte icra edilen bir deneyle ilgilenmekteydiler. Ödül olan yiyecek labirentin her iki tarafında da olabilmekteydi. Bu davranışın insanlardaki şeklini araştırmak için insanların çekebileceği iki kolu olan bir makine geliştirdiler ve Mosteller buna iki kollu canavar adını taktı. Daha sonra bu problemin matematiksel formunu meslektaşlarına sundu ve problem en sonunda genel manada çok kollu canavar olarak tanındı.

Çok kollu canavar problemleri hakkında kapsamlı bilgi Berry ve Fristed’in *Bandit Problems* isimli çalışmasında bulunabilir. Bizim kitabın bu bölümündeki odak noktamız her kolun bir ödül sunduğu ya da sunmadığı canavarlardır ve bunlarda her kolda farklı olasılık mevcuttur. Bir yazı tura atmanın Bernoulli (17’nci yüzyılda yaşamış İsviçreli matematikçi Jacob Bernoulli’nin adı) dağılımı olarak adlandırıldığı olasılık dağılımına sahip olduğu bu problem türü literatürde Bernoulli canavarı olarak bilinmektedir. Her kolda farklı ödül ve değişik veya bilinmeyen dağılımlara sahip başka türde çok kollu canavar problemleri de mevcuttur.

- 54 **ikinci makinenin gerçekte ne kadar iyi olabileceği**: Kolu daha büyük bir beklenen değerle çekmedeki miyop strateji aslında bazı durumlar-da optimaldir. Bradt, Johnson ve Karlin, “On Sequential Designs for Maximizing the Sum of N Observations” isimli çalışmalarında iki kollu canavar probleminde (bir kol için p_1 , diğeri için p_2 olasılığı olan) $p_1+p_2=1$ koşulunu sağlıyorsa bu stratejinin optimal olduğunu göstermişlerdir. Bu durum Feldman tarafından “Contributions to the ‘Two-Armed Bandit’ Problem” isimli çalışmada da doğrulanmıştır. Berry ve Fristed, *Bandit Problems* çalışmalarında miyop stratejiler konusunda daha detaya girmekte ve p_1 ve p_2 nin sadece iki değer alabildiği (örneğin 0,4 ya da 0,7 olabildiği ama hangisinin ne olduğunu bizim bilmediğimiz) durumlarda beklenen değeri en yüksek olanı seçmenin optimal olduğunu göstermektedirler.
- 55 “...bir çatışma şeklinde vücut bulmaktadır”: Whittle, “*Optimization Over Time*”.
- 56 “Ye, iç ve mutlu ol...”: Yaygın bir deyimdir ve İncil’de iki ayrı yerde (Ecclesiastes 8:15 ve Isaiah 22:13) buna çağrışım yapan ifadeler yer almaktadır.
- 56 “Neden riske gireyim ki?”: Chris Stucchio, kişisel görüşmelerden, 15 Ağustos 2013.
- 57 “*X-Men* filminin altıncısı...”: Nick Allen, “Hollywood makes 2013 the year of the sequel” <http://www.telegraph.co.uk/culture/film/film-news/9770154/Hollywood-makes-2013-the-year-of-the-sequel.html>. Ayrıca <http://www.shortoftheweek.com/2012/01/05/has-hollywood-lost-its-way> ve <http://boxofficemojo.com/news/?id=3063>.
- 58 **En büyük film şirketlerinin kâr oranları**: “Morgan Stanley’den Benjamin Swinburne 2007 ile 2011 arasında büyük medya ortaklıkları tarafından kontrol edilen beş stüdyonun vergi öncesi kârlarının yüzde 40 civarında düştüğünü söylemektedir.” “Hollywood: Split Screens,” *Economist*, 23 Şubat 2013, <http://www.economist.com/news/business/21572218-tale-two-tinseltowns-split-screens>.
- 58 **bilet satışları son 10 senenin yedisinde düşmüştür**: İstatistikler <http://pro.boxoffice.com/statistics/yearly> ve <http://www.the-numbers.com/market/> adreslerinden alınmıştır. Ayrıca bakınız Max Willens, “Box Office Ticket Sales 2014: Revenues Plunge to Lowest in Three Years” *International Business Times*, 5 Ocak 2015.

- 58 **“Artan fiyatlar ve...”**: “Hollywood: Split Screens” *Economist*, 23 Şubat 2013, <http://www.economist.com/news/business/21572218-tale-two-tinseltowns-split-screens>.
- 58 **“...entelektüel bir sabotaj...”**: Whittle’in canavar problemlerinin zorluğuna ilişkin yorumu Gittins’le olan görüşmesinde yer almaktadır, “Bandit Processes and Dynamic Allocation Indices.”
- 59 **Robbins 1952 senesinde... ispatladı**: Robbins’in “Some Aspects of the Sequential Design of Experiments” çalışması Kazan Kal, Kaybet Değiştir Algoritması’nı anlatmaktadır.
- 59 **Robbins’in ardından...**: Bradt, Johnson ve Karlin’in “On Sequential Designs for Maximizing the Sum of N Observations” çalışmaları “kazananda kalma” stratejisinin, ödülü kazanma olasılığının bir kol için belirsiz olduğu ancak diğeri için bilindiği durumlarda doğru olduğunu göstermiştir. Berry’nin “A Bernoulli Two-Armed Bandit” çalışması prensibin iki kollu canavar problemi için her zaman doğru olduğunu ispat etmiştir. Bu sonucun genelleştirilmesi (ve geçerli olmadığı durumların belirtilmesi) Berry ve Fristed’in *Bandit Problems çalışması*nda yer almaktadır.
- 59 **toplamda kaç seçenek ve fırsatımızın olduğunun**: Çok kollu canavar probleminin bu “sınırlı” versiyonunun çözümü Bellman’ın *Dynamic Programming* isimli başyapıt kitabında yer almaktadır. Optimizasyon ve makine öğrenmeleri konusunda birçok konuyu kapsayan bu kitap, ilk sayfasından itibaren etkileycidir. Dinamik programlama diğer kullanım alanlarının yanı sıra geriye doğru çıkarım yapmanın gerekli olduğu problemleri de etkili bir şekilde çözebilmektedir.
- 60 **“...imkânsızlıkla birlikte anılmaya başladı.”**: Gittins, “Bandit Processes and Dynamic Allocation Indices.”
- 62 **“en azından iyi bir yaklaşım”**: John Gittins, kişisel görüşmelerden, 27 Ağustos 2013.
- 62 **Var mısın Yok musun (Deal or No Deal)**: İlk olarak Hollanda’da “Miljoenenjacht” ismiyle başlayan bu programın dünya genelinde benzer programları yayınlanmıştır.
- 62 **çok kollu canavar probleminin de çok farklı olmadığını fark etmişti**: Daha önce bazı araştırmacılar, çok kollu canavar problemi için sınırlı çözüm bulmuşlardır (Bellman, “A Problem in the Sequential Design of Experiments”; Bradt, Johnson ve Karlin, “On Sequential Designs for Maximizing the Sum of N Observations”).

- 62 **her ikisi için geçerli tek bir değeri maksimize etme göreviyle basit bir şekilde birleştirilebilir:** Gittins İndeksinin ardındaki düşünce ilk olarak 1972 senesinde bir konferansta ortaya çıkmış ve daha sonra Gittins ile Jones'un "A Dynamic Allocation Index for the Sequential Design of Experiments" isimli çalışmasında yer almış ama kanonik gösterimi, Gittins'in "Bandit Processes and Dynamic Allocation Indices" çalışmasında yer almıştır.
- 63 **Gittins indeks değerlerini vermekteyiz:** Bernoulli için Gittins indeks değerleri tablosu Gittins, Glazebrook ve Weber'in "*Multi-Armed Bandit Allocation Indices*" çalışmasından alınmıştır ve bu çalışma konu üzerine kapsamlı bir çalışmadır. Kazanma olasılığının tamamen göz ardı edilmesini önermektedir.
- 66 **...bizi yeniliğe götürür:** Bunu uç sonuçlara götürmek bizi **En Az Hata Kuralı (Least Failure Rule)** denilen basit bir stratejiye getirir: Her zaman o ana kadar hata yapma sayısı en az olanı seçin. Yani, bir şehre ilk defa geldiğinizde rastgele bir restoran seçin. Eğer iyi ise burada devam edin. Sizi tatmin etmemeye başladığı anda diğer restoranların arasından rastgele seçin. Bu süreçte tüm restoranlar sizi bir kez hayal kırıklığına uğratana kadar devam edin ve sonra en fazla başarılı sayıda yemek yediğiniz restorana gidin. Bu strateji kazan kal stratejisi üzerine kurulmuştur ve eğer yarının kazanımına en az bugün kadar değer veren türden sabırlı bir kişiyse tam olarak Gittins İndeksinin uygulamanızı önerdiği stratejidir. (Bu kural Kelly'nin "Multi-Armed Bandits with Discount Factor Near One" çalışmasında da görülmektedir). Sürekli olarak çok sayıda yeni restoranın açılmakta olduğu büyük bir şehirde gidilecek çok yer olduğundan bu politika sizi memnun edecektir.
- 66 **bazı davranışsal ekonomi ve psikoloji araştırmalarına göre:** Örneğin, bkz. Kirby, "Bidding on the Future."
- 66 **eğer seçenekler arasında geçiş yapmanın bir maliyeti varsa:** Bu durum, Banks ve Sundaram'ın "Switching Costs and the Gittins Index" isimli çalışmalarında analiz edilmiştir.
- 67 **"Pişmanlıklar mı? Evet, birkaç pişmanlığım oldu":** Frank Sinatra, "My Way," *My Way* (1969), şarkının sözleri: Paul Anka.
- 67 **"Kendime göre, iyimser biriyim":** Başbakan Winston Churchill, Lordlar kamarası konuşmasından, Londra, 9 Kasım 1954, *Winston S. Churchill: His Complete Speeches*.

- 67 **“Denemek ve başarısız olmak en azından öğrenmek demektir”**: Barnard, “The Functions of the Executive”.
- 68 **“Çünkü 80 yaşına geldiğimde...”**: Jeff Bezos, 4 Mayıs 2001, <http://www.achievement.org/autodoc/page/bez0int-3> .
- 69 **pişmanlık konusunda bazı önemli noktaları**: Lai ve Robbins, “Asymptotically Efficient Adaptive Allocation Rules”.
- 69 **minimum pişmanlığı elde edecek algoritmaların arayışında olmuşlardır**: a.g.e. Bu tarz algoritmalar, Katehakis ve Robbins’ın “Sequential Choice from Several Populations”, Agrawal’ın “Sample Mean Based Index Policies” ve Auer, Cesa-Bianchi ve Fischer’in “Finite-Time Analysis of the Multiarmed Bandit Problem” adlı çalışmalarıyla daha iyileştirilmiştir. Bunlardan sonuncusu belki de bu türün en kolay algoritmasını sunmuştur. j koluna $(s_j/n_j) + [(2 \log n)/n_j]^{1/2}$ getirisi atanır, burada s_j , n_j oyundaki başarılı sefer sayısıdır ve n de tüm kollardaki toplam oyunların sayısıdır. Başarılı oyun sayısı olasılığının (s_j/n_j) bir üst sınırı vardır. En yüksek rakama sahip kolu seçmek logaritmik pişmanlığı garanti eder.
- 70 **“güven aralığı” olarak bilinmektedir**: Güven aralığı Neyman ile başlar, “Outline of a Theory of Statistical Estimation”.
- 71 **“belirsizlik karşısında iyimserlik”**: Kaelbling, Littman ve Moore, “Reinforcement Learning”.
- 71 **“iyimser robotlar”**: Leslie Kaelbling, kişisel görüşmelerden, 22 Kasım 2013. Bkz. Kaelbling, “Learning in Embedded Systems”.
- 71 **57 milyon dolar ilave gelir**: Siroker ve Koomen, “A/B Testing”.
- 72 **A/B testi şu şekilde işlemektedir**: Christian, “The A/B Test”. Ayrıca Steve Hanov, kişisel görüşmeler, 30 Ağustos 2013 ve Noel Welsh, kişisel görüşmeler, 27 Ağustos 2013.
- 72 **Obama’nın bağış sayfası**: Dan Siroker, “How We Used Data to Win the Presidential Election” (ders notlarından), Stanford University, 8 Mayıs 2009, <https://www.youtube.com/watch?v=71bH8z6iqSc> . Ayrıca, Siroker, “How Obama Raised \$60 Million,” <https://blog.optimizely.com/2010/11/29/how-obama-raised-60-million-by-running-a-simple-experiment/>.
- 73 **kullanıcıları üzerinde canlı A/B testleri**: Google’ın ilk A/B testi, 27 Şubat 2000’de icra edildi. Bkz. Christian, “The A/B Test”.
- 73 **Şirketler internet sitelerindeki gezinme seçeneklerini**: Bkz. Siroker ve Koomen, “A/B Testing”.

- 73 **41 çeşit mavi tonunu test etmiştir:** Laura M. Holson, “Putting a Bol-der Face on Google”, New York Times, 28 Şubat 2009.
- 73 **“neslimin en parlak zekâları insanların reklamlara nasıl tıklayabi-lecekleri üzerine kafa yormaktadır”:** Ashlee Vance, “Tech Bubble Is Different”, Bloomberg Businessweek, 14 Nisan 2011. http://www.bloomberg.com/bw/magazine/content/11_17/b4225060960537.htm .
- 74 **yıllık yaklaşık 50 milyar dolarlık gelirin:** Google’ın finansal değeri üç aylık hisse raporlarında detaylı olarak yer almaktadır. 2013 senesi-ne ait bildirilen reklam geliri 50,6 milyar dolardı ve 55,6 milyar dolarlık toplam gelirin kabaca yüzde 91’ine karşılık gelmekteydi. Bkz. <https://investor.google.com/financial/2013/tables.html> .
- 74 **çevrim içi ticaret her yıl yüzlerce milyar dolarlık hacme sahiptir:** Çevrim içi satış tahminleri Forrester Research tarafından yapılmıştır. Bkz. “US Online Retail Sales to Reach \$370B By 2017; €191B in Europe,” Forbes, 3/14/2013, <http://www.forbes.com/sites/forrester/-2013/03/14/us-online-retail-sales-to-reach-370b-by-2017-e191b-in-europe/> .
- 75 **Kullanılacak en iyi algoritmalar:** Örneğin Chris Stucchio, “Why Multi-armed Bandit Algorithms Are Superior to A/B Testing” isimli çok iyi bir makale kaleme aldı ve daha sonra yine kendisi tarafından “Don’t Use Bandit Algorithms— They Probably Won’t Work for You” isimli en az ilki kadar iyi bir makale daha yazdı. Bkz. https://www.chrisstucchio.com/blog/2012/bandit_algorithms_vs_ab.html ve https://www.chrisstucchio.com/blog/2015/dont_use_bandits.html . Stucchio’nun 2012 senesindeki paylaşımı kısmen Paras Chopra’nın “Why Multi-armed Bandit Algorithm Is Not ‘Better’ than A/B Testing” (<https://vwo.com/blog/multi-armed-bandit-algorithm/>), makale-sine referans olarak yazılmıştı ve bu makalenin de kısmen Steve Ha-nov tarafından yazılmış olan “20 lines of code that will beat A/B tes-ting every time” (<http://stevehanov.ca/blog/index.php?id=132>) yazı-sına bir referanstı.
- 75 **Washington Star’da yayınlanana kadar:** Jean Heller, “Syphilis Pati-ents Died Untreated”, *Washington Star*, 25 Temmuz 1972.
- 75 **Belmont Raporu’nu 1979’da yayınladı:** The Belmont Report, Araştır-malarda kullanılan insan deneklerin korunmasına yönelik prensip ve

kurallar, 18 Nisan 1979. <http://www.hhs.gov/ohrp/humansubjects/guidance/belmont.html>.

- 77 **“adaptif” (uyarlamalı) deneyler icra etmeyi önermiştir:** Bkz. Zelen, “Play the Winner Rule and the Controlled Clinical Trial”. Radikal bir fikir olmasına karşın Zelen, bunu öneren ilk kişi değildi. İlk olma onuru Yale’den William R. Thompson’a, bir tedavinin etkin olup olmadığını tanımlama problemini formüle eden ve kendi çözümünü 1933’te sunan kişiye aittir. (Thompson, “On the Likelihood at One Unknown Probability Exceeds Another”).

Thompson’ın önerdiği çözüm (seçenekleri rastgele örneklemek) makine öğrenme konusundaki yakın zamanda yapılan çalışmalara esas teşkil etmektedir. (Yeniden 9’uncu bölümdeki rastlantısallık ve örneklemenin algoritmik kullanımına geri dönüyoruz).

Ne Frederick Mosteller’in ne de Herbert Robbins’in iki kollu canavar problemi üzerinde çalışmaya başladıklarında Thompson’ın çalışmasından haberleri vardı. Richard Bellman birkaç sene sonra “çok da bilinmeyen” yazıları bulmuştur ve “İtiraf etmeliyiz ki bu tarz çalışmaları başka konulardaki çalışmalar arasında gezinirken bulmaktayız” demiştir (Bellman, “A Problem in the Sequential Design of Experiments”).

- 78 **ECMO... yenidoğan bir kız çocuğunun hayatını kurtardı:** Michigan Üniversitesi Cerrahi Bölümü “‘Hope’ for ECMO Babies”, <http://surgery.med.umich.edu/giving/stories/ecmo.shtml>.
- 78 **şimdi 40’inci yaş gününü kutluyor:** Michigan Üniversitesi Sağlık Bölümü, “U-M Health System ECMO team treats its 2,000th patient,” 1 Mart 2011, <http://www.uofmhealth.org/news/ECMO%202000th%20patient>.
- 78 **yetişkinler üzerinde yapılan ilk çalışmalar:** Zapol ve diğerleri, “Extracorporeal Membrane Oxygenation in Severe Acute Respiratory Failure”.
- 78 **yenidoğanlarla bir çalışma:** Bartlett ve diğerleri, “Extracorporeal Circulation in Neonatal Respiratory Failure.”
- 79 **“ECMO’nun daha ileri düzey çalışmalarda rutin olarak kullanımı onaylamadıkları”:** Ware’den alıntı, “Investigating Therapies of Potentially Great Benefit: ECMO,” Ware ve Epstein, “Comments on ‘Extracorporeal Circulation in Neonatal Respiratory Failure’”, Bart-

- lett ve diğerleri, “Extracorporeal Circulation in Neonatal Respiratory Failure”.
- 80 **“Rastgele hasta ataması yapmayı daha fazla savunmanın etik olarak çok zor olduğu”**: Ware, “Investigating Therapies of Potentially Great Benefit: ECMO.”
- 80 **dünyanın önde gelen uzmanlarından**: Bir kazananda ısrar etmenin optimal olduğunu 1971’de doktora tezinde ispatlayan Berry’ydi. Sonuçlar, “A Bernoulli Two-Armed Bandit” ismiyle yayınlandı.
- 80 **“Bana göre Ware çalışması hiç yapılmamalıydı”**: Berry, “Comment: Ethics and ECMO”.
- 80 **İngiltere’de yaklaşık 200 yenidoğan bebek**: UK Collaborative ECMO Group, “The Collaborative UK ECMO Trial.”
- 81 **çeşitli kanser tedavileri için klinik deneyler**: Don Berry, Kişisel görüşmelerden, 22 Ağustos 2013.
- 81 **FDA 2010 Şubat ayında**: FDA’nın “Adaptive Design Clinical Trials for Drugs and Biologics” isimli 2010 Şubat ayındaki çalışması <http://www.fda.gov/downloads/Drugs/Guidances/ucm201790.pdf> adresinde bulunabilir.
- 82 **üzerinde lambaların olduğu kutular gösterilmiş**: Çalışma, Tversky ve Edwards’ın “Information Versus Reward in Binary Choices” isimli yazısında bulunabilir.
- 83 **iki seçenek arasında tercihte**: Meyer ve Shi, “Sequential Choice Under Ambiguity.”
- 83 **dört kollu canavar deneyi**: Steyvers, Lee ile Wagenmakers, “A Bayesian Analysis of Human Decision-Making on Bandit Problems.”
- 84 **“hareketli canavar”**: Bunlar, bazı durumlarda kullanılabilen Gittins İndeksi’ne benzer bir strateji sunan Whittle’in “Restless Bandits” çalışmasında yer alır. Bu konulardaki hesaplama zorlukları ve ardından gelen verimli zamanda ulaşılabilen optimal çözümler konusundaki kötümserlikten Papadimitriou ve Tsitsiklis’in “The Complexity of Optimal Queuing Network Control” çalışmasında bahsedilmektedir.
- 84 **dünyadaki şartlar değiştiğinde**: Navarro ve Newell’in “Information Versus Reward in a Changing World” çalışması insanların aşırı derecede araştırma yapmasının dünyanın sürekli değiştiğine dair olan varsayımlarından kaynaklandığına dair yeni sonuçlar sunmaktadır.
- 85 **“Aslında... bir uyum vardır.”**: Thoreau, “Walking.”

- 85 **“bir kutu kola daima bir kutu koladır”**: Warhol, The Philosophy of Andy Warhol.
- 86 **“Size araştır/kullan dengesini çözmenin gelişimsel bir yolunu sunmaktadır.”**: Alison Gopnik, Kişisel Görüşmelerden, 22 Ağustos 2013. Ayrıca bakınız Gopnik, The Scientist in the Crib.
- 88 **“Yaşamımın okumaya ayırdığım bölümünde”**: Lydia Davis, “Someone Reading a Book”, “Can’t and Won’t: Stories”.
- 88 **yaşlanma hakkındaki ön yargılarımızla mücadele ederek**: Bkz. Carstensen, “Social and Emotional Patterns in Adulthood”.
- 89 **“...seçim sürecinin sonuçlarıdır”**: a.g.e.
- 89 **ülkenin diğer ucuna taşınmak üzere**: Fredrickson ve Carstensen, “Choosing Social Partners”.
- 89 **tercihlerinden ayrılamayacak kadar benzerlik göstermiştir**: Fung, Carstensen ve Lutz, “Influence of Time on Social Preferences.”
- 91 **yaşlı kişilerin genellikle sosyal çevreleri konusunda daha fazla memnun olduklarını**: Yaşlanmayla birlikte gelen duygusal durumdaki gelişmelere dair kanıtlar, Charles ve Carstensen’in “Social and Emotional Aging” isimli çalışmasında tartışılmıştır.

3. Sıralama (Sorting)

- 93 **“Bulmayı arzuladığınız kelime eğer”**: Cawdrey, A Table Alphabetically, ilk İngilizce sözlüktür. Sıralama hakkında daha fazlası için bkz. Knuth, “The Art of Computer Programming”, §6.2.1. Alfabetik sıralama hakkında daha fazlası için bkz. Daly, “Contributions to a History of Alphabetization”.
- 93 **Oda arkadaşı temiz çamaşırların olduğu sepetten çorabın tekini alıyordu**: Hillis, “The Pattern on the Stone”.
- 94 **programlama sitesi Stack Overflow’da paylaşılan**: “Pair socks from a pile efficiently?” “amit” isimli kullanıcı tarafından Stack Overflow’da 19 Ocak 2013’te paylaşıldı, <http://stackoverflow.com/questions/14415881/pair-socks-from-a-pile-efficiently> .

“amit” (gerçek ismi Amit Grossolan eski bir Technion öğrencisi) şöyle yazmıştı: “Dün yıkanmış çorapları düzenliyordum ve yapma şeklimin çok verimli olmadığını fark ettim. Safça bir arama içindeydim. Bir tek alıyor ve çamaşır yığınının içinde diğer eşini arıyordum. Bir bilgisayar bilimcisi olarak ne yapabilirim diye düşündüm.” Amit’in sorusu bir dizi cevap yarattı ama programlamacı arkadaşla-

rından en fazla destek gören cevap bir Radix Sıralaması yapmaktır: Çorapların farklılık gösterdiği alanları (renk, desen, vb.) belirleyin ve bunları ayıracak şekilde düzenleyin. Her sıralama, çorap seti üzerinden tek geçişi gerektirir ve sonuç daha küçük yığınlardır. Eşleri bulmak için bu yığınlardan bir kez daha geçmeniz gerekse bile bunun için gerekli olan süre tüm yığının sayısının karesinden ziyade küçük yığınlardan sadece en büyüğündeki çorap sayısının karesi kadardır. Eğer çorapları eşlememizin nedeni ihtiyacımız olduğunda bir çift sahip olmak ise o zaman arama için daha iyi bir prosedür benimseyerek ihtiyacı azaltabiliriz.

Diyelim ki çoraplarınız tek alanda -renk- birbirlerinden ayrılmakta ve çekmecenizde üç çift eşleşmemiş çorap var. O zaman çekmece-den dört adet çorap çıkardığınızda bir çift çorap bulmanız kesindir. (Bunun nedenini anlamak için en kötü senaryoyu düşünün. İlk seçtiğiniz üç çorabın hepsi farklı renktedir. Dördüncüyü seçtiğinizde elinizdekilerden biriyle eşleşmek zorundadır). Ne kadar renkle ilgilenirseniz ilgilenin renk sayısının bir fazlası seçim size bir çift eşlenmiş çorabı garanti eder. Eğer sabahları biraz daha bol vaktiniz varsa eşleştirme zahmetine hiç katlanmayın.

Çorap eşleştirmenin bu basit çözümü 19'uncu yüzyıl Alman Matematikçisi Peter Gustave Lejeune Dirichlet'e atfedilen Güvercin Deliği prensibinin bir lütfudur (Rittaud ve Heeffer, "The Pigeonhole Principle"). Buradaki düşünce çok basittir. Eğer bir güvercin sürüsü yuva deliklerinin olduğu yere konarsa ve yuvadan daha fazla güvercin varsa, en azından bir yuvada birden fazla güvercin olacak demektir. Güvercin Deliği prensibi bilgisayar biliminde algoritmaların teorik özellikleri hakkındaki temel gerçekleri belirtmek için kullanılır. Örneğin, herhangi bir dosyayı bilgi kaybetmeksizin sıkıştıracak bir algoritma yapmak imkânsızdır çünkü kısa dosyalardan daha fazla sayıda uzun dosya mevcuttur.

Güvercin deliği prensibini uygulamak çorap eşleme problemine kalıcı bir çözüm sunar: Sadece tek çeşit çorap satın alın. Eğer tüm çoraplarınız aynı olursa onları eşlemek zorunda kalmazsınız çünkü çekmecedan her iki çorap alışınızda bir çift çorabınız olur. Birçok bilgisayar mühendisi için (Amit'in sorusunu yanıtlayanlar da dâhil olmak üzere) bu en güzel yaklaşımdır: Verimli bir şekilde çözülebilecek şekilde problemi yeniden tanımlamak.

Yine de son bir uyarı: Tek tıp çorap aldığınızda hangi tür olduğuna dikkat edin. Ron Rivest'in çoraplar ile sıkıntı yaşamasının nedeni sol ve sağ ayağı için farklı çorap giymesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda çiftlerin sayısından bir fazla çorap çekeceğiniz Güvercin Deligi kuralı sayesinde garantilenmiş olur.

- 94 **“Çoraplar benim aklımı karıştırıyor!”**: Ronald Rivest, kişisel görüşmelerden, 25 Temmuz 2013.
- 94 **“kör olmaması ve delirmemesi...”**: Martin, “Counting a Nation by Electricity.”
- 95 **“...Cihaz Tanrı'nın yel değirmenleri gibi hatasız...”**: a.g.e.
- 95 **“Bu cihazı devlet kurumlarından başka hiç kimse kullanmayacağı için...”**: Herman Hollerith.
- 95 **Hollerith'in şirketi... diğer şirketlerle birleşti**: Herman Hollerith.
- 95 **“Hafızaya alınan bir program” için yazılan ilk kod...**: Burada geçen yazılı ifadesi gerçekten elle yazılanı kastetmektedir. Ünlü matematikçi John von Neumann 1945'te sıralama programını yazdığı programın yazıldığı bilgisayarın işlemi tamamlamasına daha yıllar vardı. Bilgisayar programları genel olarak 1843'te Ada Lovelace'in yazılarına kadar geri gitse de von Neumann'ın programı bilgisayarın hafızasına kaydedilecek olan ilk programdı. Daha önceki hesaplama makineleri içlerine yerleştirilen delikli kartlar için bkz. Knuth, “Von Neumann's First Computer Program”.
- 95 **IBM'in kart sıralama makinesini**: a.g.e.
- 95 **hesaplama kaynaklarının yüzde 25'inden fazlasının**: Knuth, “The Art of Computer Programming”, sf. 3.
- 97 **“İnsanlar ürün birim maliyetini düşürmek için genellikle üretim hacmini artırmaktadır”**: Hosken, “Evaluation of Sorting Methods”.
- 98 **bir deste oyun kâğıdını en hızlı şekilde sıralama rekoru**: Bradáč'in performansının internette videosunu bulamamış olmama rağmen bu rekoru geride bırakmak üzere denemeler yapan pek çok kişinin videosu mevcuttur. Kartları cinslerine göre dörde ayırma ve sonra da numaraları sıralama eğilimindedirler. Donald Knuth, “The Art of Computer Programming” yayınında şöyle demektedir: “Bunu yapmanın daha hızlı bir yolu var!” İlk olarak kartları değerlerine göre 13 parçaya ayırın (bir grup tüm ikileri, diğeri tüm üçleri içerecek şekilde vb). Daha sonra tüm grupları üst üste toplayın ve bu sefer türlerine göre dörde ayırın sonuç olarak da numara sırasına sahip türlerine göre ay-

rılmış dört kart grubunuz olacaktır. Bu Radix Sıralamasıdır ve bölümün ilerleyen kısımlarında bahsedilen Kova Sıralaması ile ilgilidir. Bkz. Knuth, “The Art of Computer Programming”, §5.2.5.

- 99 **Kabaca bu sayıda kartları kararsak:** Nesneleri rastgele sıralamak ve en iyi sonucu ummak aslında ismi olan bir algoritmadır: Bogosort. Kötümser algoritma tasarlayanlar en kötü sonucu veren performans konusunda birbirlerini geride bırakmak için yarışır.

Konunun biraz daha derinlerine inmek gerekirse kötümser algoritma tasarımcıları Bogosort’un çok verimli olmaktan uzak olduğu sonucuna varmışlardır. Bu nedenle “iyileştirilmiş” versiyonları olan Bogobogosort ilk olarak ilk iki elemanı Bogosort işlemine tabi tutarak, sonra da ilk üç ve ilk dört eleman diye devam ederek kademeli olarak ilerler. Eğer herhangi bir noktada listedeki sıra bozulursa Bogobogosort baştan başlar. Bu nedenle algoritma örneğin, ilk iki kartı havaya atıp doğru bir şekilde düştüklerini ve daha sonra da ilk üç kâğıdı havaya atıp üçünün de doğru düştüğünü görmeden tamamlanamayacaktır. Hepsı sıralı olmalıdır yoksa algoritma baştan başlar. Bogobogosort hakkında ilk yazılardan birini hazırlamış olan mühendislerden biri tüm gece boyunca algoritmayı bilgisayarında çalıştırdığını ve yedi adet şeyi sıraya koyamadıktan sonra elektriğe acıyarak kapattığını söylemektedir.

Arkadan gelen başka mühendisler Bogobogosort’un kuyunun en dibinde yer almadığını söylemişlerdir: Nesneleri sıralayan bir bilgisayar programı oluşana kadar bilgisayarın hafızasındaki bitleri rastgele olarak yer değiştirir. Böylesine bir canavarlığın zaman sınırları hâlen araştırılmaktadır. Kötümserlik avı sürmektedir.

- 100 **Bilgisayar bilimi... geliştirmiştir:** Büyük-O gösterimi Paul Bachmann’ın “Die Analytische Zahlentheorie” isimli 1894 senesinde yayınlanan kitabında başlamıştır. Ayrıca bkz. Donald Knuth, “The Art of Computer Programming”, §1.2.11.1. Resmi olarak bir algoritmanın çalışma süresinin eğer $f(n)$ değerinden az ya da pozitif bir tamsayı olan katına eşit ise $O(f(n))$ olduğunu söyleriz. Buna ilave olarak Büyük Omega gösterimi $\Omega(f(n))$ [çalışma zamanı $f(n)$ ’in daha büyüğü ya da birden fazla katına eşitse] ve Büyük Teta gösterimi de $\Theta(f(n))$ [çalışma zamanı hem $O(f(n))$ hem de $\Omega(f(n))$ ’e eşit ise] mevcuttur.
- 102 **“Kabarcık sıralama dediğinde beni kazandı”:** Bu mühendis daha önce 2’nci bölümde karşılaştığımız Dan Siroker’dır. Bkz. “The A/B

Test: Inside the Technology at's Changing the Rules of Business", Wired, Mayıs 2012.

- 105 **bilgi işleme 19'uncu yüzyılda ABD nüfus sayımlarında:** Daha fazlası için bkz. Knuth, "The Art of Computer Programming", §5.5.
- 106 **saklı yazılım bilgisayarlarının gücünü göstermek için:** Bilgisayar testi EDVAC makinesiydi ve o zamanlar von Neumann'ın programı çok gizli askeri istihbarat olarak sınıflandırılmıştı. Bkz. Knuth, "Von Neumann's First Computer Program".
- 106 **"Birleştirmeli Sıralama sıralama tarihinde, sıralamanın bilgisayar tarihindeki önemi kadar önemlidir.":** Katajainen ve Trä, "A Meticolous Analysis of Mergesort Programs".
- 106 **Büyük ölçekli endüstriyel sıralama problemleri için bir metot:** Mevcut kayıtlara, <http://sortbenchmark.org/> adresinden ulaşılabilir. 2014 senesi itibariyle Samsung'dan bir grup, bir dakika içinde en fazla veriyi sıralama rekorunu elinde bulundurmaktadır: 3,7 Terabaytlık veri. Zdeněk Bradáč'ın kırdığı insan rekoruyla karşılaştırmasını yapacak olursak bunun karşılığı, 37 milyar adet oyun kâğıdıdır ve 500 Boeing 747'yi doldurmaya yeter.
- 107 **dakikada 167:** Gönderim bölümü şefi Tony Miranda şöyle demektedir: "Sanırım en yüksek performansımız saatte 250 sepettir. Ortalamaımız ise saatte 180 sepet. Her sepetin içinde 40'tan fazla kitap olduğunu da unutmayın." "KCLS AMH Tour", 6 Kasım 2007, <https://www.youtube.com/watch?v=4fq3CWsyde4>.
- 107 **-günde 85.000- kitabı geçirir:** "Reducing operating costs", American Libraries Magazine, 31 Ağustos 2010, <http://www.americanlibraries-magazine.org/aldirect/al-direct-september-1-2010>.
- 109 **"boş versene":** Bkz. Matthew Taub, "Brooklyn & Manhattan Beat Washington State in 4th Annual 'Battle of the Book Sorters'", Brooklyn Brief, 29 Eylül 2014, <http://brooklynbrief.com/4th-annual-battle-book-sorters-pits-brooklyn-washington-state/>.
- 109 **umabileceğimiz en iyi zaman aralığıdır:** n sayıda nesnenin tam olarak sahip olabileceği birbirinden farklı sıralanma sayısı $n!$ 'dir. Bu nedenle bir dizi tam olarak $\log n!$ bit veri üretir ve bu da yaklaşık olarak $n \log n$ bite eşittir. $n!$ 'in $n \times (n-1) \times (n-2) \times \dots \times 1$ olduğunu düşündüğümüzde, n 'in en büyük olduğu n kadar sayının çarpıma eşit olduğunu biliriz. Sonuç olarak $n! < mn$, bu nedenle de $\log n! < \log mn$ olur ve bu da bize $\log n! < n \log n$ 'i verir. Bu yakınsamaya "Stirling

yakınsaması” denir ve 18’inci yüzyıl İskoç matematikçisi James Stirling’in adıyla anılmaktadır. Tek karşılaştırma en fazla bir bit bilgi üreteceğinden n nesne için olan $n!$ sıranın hangisinin doğru olduğu konusundaki belirsizliği tam olarak ortadan kaldırmak adına $n \log n$ karşılaştırma gerekir. Daha fazlası için bkz. Knuth, “The Art of Computer Programming”, §5.3.1.

- 111 **“Edindiğim tecrübeler göre”**: Jordan Ho, kişisel görüşmelerden, 15 Ekim 2013.
- 113 **“aşırı e-posta yükü” üzerine bir yazı**: Whittaker ve Sidner, “Email Overload”.
- 114 **“hayatlarının bir bölümünü boşa harcadıklarını”**: Steve Whittaker, kişisel görüşmelerden, 14 Kasım 2013.
- 114 **“çim zemin tenis turnuvasında”**: Dodgson, “Lawn Tennis Tournaments.”
- 116 **garip çözüm**: Bir bilgisayar mühendisinin Dodgson’ın turnuva önerisine ilişkin eleştirileri için bkz. Donald Knuth “The Art of Computer Programming” çalışmasındaki “minimum-comparison selection”, §5.3.3.
- 117 **64 takımın hepsini sıralamaz**: Bir sıralama algoritmasından ziyade “seçme” algoritması olarak tanımlanan algoritma tüm nesneleri ya da takımları sıralamaktansa bunlardan birini en büyük ya da ikinci büyük medyan olarak tanımlar.
- 118 **Beyzbol ligi ve NCAA turnuvalarının baş planlayıcılarından**: Trick, kurucularından olduğu Sports Scheduling Group’un bir parçası olarak çalışmaktadır. 1981’den 2004’e kadar Beyzbol ligi fikstürü saygıdeğer karı koca Henry ve Holly Stephenson tarafından elle oluşturulmaktaydı. ESPN Stephenson’ların hikâyesini Joseph Garner’ın yönettiği Schedule Makers isimli kısa bir film ile belgesel hâline getirdi.
- 119 **“belirsizlik sezon sonuna kadar devam etmektedir”**: Michael Trick, kişisel görüşmelerden, 26 Kasım 2013.
- 119 **“Tam bir sıralama oluşturulması için”**: a.g.e.
- 120 **“3-2’lik bir skor...”**: Tom Murphy, “Tuning in on Noise?”, 22 Haziran 2014’te “Do the Math”te yayımlanmıştır. Blog: <http://physics.ucsd.edu/do-the-math/2014/06/tuning-in-on-noise/>
- 121 **araştırmacıların sağlamlık (robustness) dedikleri şeye ...**: Ackley, “Beyond Efficiency”.

- 121 **“Kabarcık Sıralamanın gözle görülür herhangi bir kurtarıcı özelliğinin olmadığını”**: Knuth, “The Art of Computer Programming”, §5.5.
- 121 **bahsi geçen onurun sahibi**: Dave Ackley, kişisel görüşmelerden, 26 Kasım 2013. Bkz. Jones ve Ackley, “Comparison Criticality in Sorting Algorithms” ve Ackley, “Beyond Efficiency”. Daha fazlası için Knuth, “The Art of Computer Programming”, §5.2.
- 123 **“profesyonel bir poker oyuncusunun en önemli yeteneği”**: Isaac Haxton, kişisel görüşmelerden, 20 Şubat 2014.
- 124 **“İki maymun hayal edin”**: Christof Neumann, kişisel görüşmelerden, 29 Ocak 2014.
- 125 **“kümeslerdeki düşmanca davranışlar”**: Craig, “Aggressive Behavior of Chickens”.
- 126 **çok önemli bilişim yükü**: Jessica Flack, kişisel görüşmelerden, 10 Eylül 2014. Ayrıca bkz. DeDeo, Krakauer ile Flack, “Evidence of Strategic Periodicities in Collective Conflict Dynamics”; Daniels, Krakauer ile Flack, “Sparse Code of Conflict in a Primate Society”; Brush, Krakauer ile Flack, “A Family of Algorithms for Computing Consensus About Node State from Network Data.” Flack’in çalışmalarına daha kapsamlı bir bakış için bkz. Flack, “Life’s Information Hierarchy”.
- 127 **Bu spor müsabakası maratondur**: Maratonun sıralama dünyasında bir yeri vardır. Karşılaştırma dışı sıralama teorisine dair ilgi çekici bir gelişme hiç beklenmedik bir yerden gelmiştir; *4chan* isimli bir paylaşım sitesinden. 2011’in başlarında bu sitede yapılan bir paylaşım şöyle diyordu: “Hey, ben bir dâhiyim. Yeni keşfettiğim şu sıralama algoritmasına bir bakın.” Paylaşımında bulunan kişinin algoritması -uyku sıralaması- sıralanmamış her nesne için değeri kadar uyumasını söyleyen bir komut yaratmakta ve daha sonra da uyanarak kendisini çıktı olarak sıraya sokmasını söylemekteydi. Son çıktı sıralı olmaktaydı. Bu algoritmanın mantığında yer alan hataları bir kenara bırakırsak, sıkıntılı bir yanı bulunmaktaydı. Çalışma süresi nesnelerin sayısına değil, boyutlarına bağlı olan bir algoritma sunmuştu.
- 128 **“Siz paraya gidersiniz, para size gelmez”**: İngiliz girişimci Alexander Dean tarafından kullanılmıştır, <https://news.ycombinator.com/item?id=8871524>.

- 128 **“büyük olan baskın olandır”**: Gros Ton Kanunu’nun okyanusta gerçekten geçerli olduğu görülmektedir. Fakat bu, balıkların tamamen barışçıl oldukları anlamına gelmez. Boyutları yakın olduğunda birbirleriyle savaşırlar.

4. Önbellekleme (Caching)

- 131 **“Bilgilerimizin pratik bir şekilde kullanımında”**: James, “Psychology”
- 131 **O hâlde bir değil, iki sorunuz var**: Bu ifade ilk olarak Netscape mühendisi Jamie Zawinski tarafından 12 Ağustos 1997’de Usenet’te bir paylaşımda kullanıldı. Bkz. Stewart, “Martha Stewart’s Homekeeping Handbook”.
- 132 **“Tüm eteklerinizi eteklerle, pantolonlarınızı pantolonlarla, elbiselerinizi elbiselerle ve montlarınızı montlarla gruplandırarak asın”**: Jay, The Joy of Less.
- 132 **“Her tür de kendi içerisinde... düzenlenmelidir”**: Mellen, „Unstuff Your Life!”.
- 133 **“çok keskin bir zekâsı vardı”**: Davis, “Almost No Memory”.
- 133 **bilgi işlemin temel prensiplerinden biri**: Hafıza konusundaki geçmişimize dair kayıtlarımız Hennessy ve Patterson’ın “Computer Architecture” çalışmasına dayanmaktadır.
- 134 **elektrikli bir “hafıza organı”**: Burks, Goldstine ile von Neumann, “Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument”.
- 134 **1962 senesinde İngiltere, Manchester’da Atlas isimli bir süper bilgisayarın**: Kilburn ve diğerleri, “One-Level Storage System”.
- 135 **“otomatik olarak biriktirmekteydi”**: Wilkes, “Slave Memories and Dynamic Storage Allocation.”
- 135 **IBM 360/85 süper bilgisayarı kullanıldı**: Conti, Gibson ile Pitkowsky, “Structural Aspects of the System/360 Model 85”.
- 136 **bilgisayar işlemcilerindeki transistör sayısının her iki yılda bir ikiye katlanacağına dair**: Moore’un 1965’te “Cramming More Components onto Integrated Circuits” adlı çalışmasında yaptığı tahmin 1975’te kendisi tarafından “Progress in Digital Integrated Electronics” çalışmasında güncellenmişti.
- 136 **altı kademeli hafıza hiyerarşisine**: Daha fazlası için bkz. Wulf ve McKee, “Hitting the Memory Wall”.

- 137 **“gereksiz gerçeklerin faydalı olanların yerini almadığından emin olun”**: Conan Doyle, “A Study in Scarlet: Reminiscences of John H. Watson”.
- 137 **“sonsuz kadar saklanamaz”**: Wilkes, “Slave Memories and Dynamic Storage Allocation”.
- 137 **Bélády 1928 senesinde Macaristan’da doğmuş ve**: Bélády’nin kişisel hayatı hakkındaki bilgiler, Philip L. Frana ile 2002’de yaptığı sözlü bir görüşmeye dayanmaktadır (<https://conservancy.umn.edu/bitstream/107110/1/oh352lab.pdf>). Önbellek algoritmaları ve sonuçlarına ilişkin analizleri Bélády’nin “A Study of Replacement Algorithms for a Virtual- Storage Computer” çalışmasında yer alır.
- 137 **en fazla atıfta bulunulan bilgisayar bilimi araştırması**: Bélády’nin kendi kelimeleriyle, “1965 te yazılan çalışmam 15 yıl süresince yazılım alanında en fazla atıfta bulunulan yazı oldu”, J. A. N. Lee, “Laszlo A. Bélády”, Computer Pioneers, <http://history.computer.org/pioneers/belady.html>.
- 139 **LRU’nun düzenli bir şekilde...**: Bélády birkaç yıl sonra FIFO’nun bazı ilginç eksiklikleri olduğunu gösterdi. Özellikle artan önbellek boyutunun performansı aslında kötüleştirebildiğini ve Bélády Anomalisi olarak bilinen bir durumu yarattığını gözler önüne serdi. Bélády, Nelson ile Shedler, “An Anomaly in Space-Time Characteristics of Certain Programs Running in a Paging Machine”.
- 140 **“kâğıtları karıştırmanın dijital karşılığı”**: Aza Raskin, “Solving the Alt-Tab Problem”, <http://www.azarask.in/blog/post/solving-the-alt-tab-problem/>.
- 140 **Çıkarma politikaları üzerine olan literatür**: Daha karmaşık bir önbellek algoritması yazmayla ilgileniyorsanız ilginizi çekecek LRU’nun bazı popüler çeşitleri aşağıda sunulmuştur.
- LRU-K: O’Neil, O’Neil ile Weikun, “eLRU-K Page Replacement Algorithm for Database Disk Buffering,” çalışması K ’nıncı en son kullanımdan bu yana geçen süreye bakar (K seferdir kullanılmayanlar için maksimum süreye eşittir) ve bir frekans ön yargısı öne sürer. En son kullanıma odaklanan LRU-2 en yaygın türüdür.
 - 2Q: Johnson ve Shasha’nın, bir parça frekans bilgisi edinmek için nesneleri iki ayrı “kuyruğa” ayıran “2Q: A Low Overhead High Performance Buffer Management Replacement Algorithm” çalış-

malarıdır. Nesneler ilk başta ilk kuyruktadırlar ve önbellekte bulundukları sürede yeniden kullanılırlarsa ikinci kuyruğa terfi ederler. Nesneler kullanılmazlar ise bu seferde LRU kullanılarak ikinci kuyruktan tekrar birinci kuyruğa gönderilirler.

- LRFU: Lee ve diğerlerinin, yakın zamanda gerçekleşme ve frekansı birleştiren ve her bir nesneye her kullanımda artan ama geçen zamanla birlikte azalan bir sayı atayan “LRFU: A Spectrum of Policies at Subsumes the Least Recently Used and Least Frequently Used Policies” isimli çalışmaları.
- Adaptive Replacement Cache (ARC): Megiddo ve Modha’nın 2Q’ya benzer bir şekilde iki kuyruk kullanan lakin performansa dayalı olarak kuyrukların boylarını da ekleyen “Outperforming LRU with an Adaptive Replacement Cache Algorithm” isimli çalışmaları.

Bu algoritmaların önbellek yönetimi konusunda LRU’yu performans olarak geride bıraktıkları gösterilmiştir.

- 140 **bilgisayar mühendislerinin favorisidir:** Örneğin, Pavel Panchekha 2012 senesinde Dropbox blogu için Dropbox’ın LRU kullanımını açıkladığı bir makale yazdı, <https://tech.dropbox.com/2012/10/caching-in-theory-and-practice/>.
- 141 **Gardner tesisinin derinliklerinde:** Ziyaretimiz esnasında Berkeley Üniversitesi öğrencilerinin ne okuduklarını tam olarak bilmek isteyen meraklı okuyucularımız için: Thoreau’nun Walden eseri; Song of Myself üzerine eleştiri yazıları, Cormac McCarthy, James Merrill, Thomas Pynchon, Elizabeth Bishop, J. D. Salinger, Anaïs Nin, ve Susan Sontag; Junot Díaz’dan Drown; Telegraph Avenue ve The Yiddish Policemen’dan Union by Michael Chabon; Annie Proulx’dan Bad Dirt ve Bird Cloud; Mark Strand’dan Mr. and Mrs. Baby; Philip K. Dick’ten The Man in the High Castle; William Carlos Williams şiirlerinden ve yazılarından derlemeler; Chuck Palahniuk’ten Snu; Toni Morrison’dan Sula; Denis Johnson’dan Tree of Smoke; Juliana Spahr’dan The Connection of Everyone with Lungs; Jorie Graham’dan The Dream of the Unified Field; David Sedaris’ten Naked, Me Talk Pretty One Day, ve Dress Your Family in Corduroy and Denim; Sylvia Plath’tan Ariel ve David Mame’ten Oleanna; D. T. Max’ın David Foster Wallace biyografisi; C. D. Wright’tan Like Something Flying Backwards, Translations of the Gospel Back into

Tongues ve Deepstep Come Shining; T. S. Eliot'ın yazıları; Edgar Allan Poe'dan Evreka; Herman Melville'den Billy Budd, Sailor ve kısa şiir ve yazı çalışmaları; Henry James'ten The Aspern Papers, The Portrait of a Lady ve The Turn of the Screw; Billy Budd hakkında Harold Bloom çalışması, Benito Cereno ve "Bartleby the Scrivener"; Eugene O'Neill oyunları; Neil Gaiman'dan Stardust; Sherman Alexie'den Reservation Blues; Cormac McCarthy'den No Country for Old Men ve daha fazlası.

- 141 **"12 yıldır kullanılmayan bir kitap varsa, bu çıkarılır"**: Elizabeth Dupuis, kişisel görüşmelerden, 16 Eylül 2014.
- 143 **"bire bir ölçekli"**: Carroll, Sylvie ile Bruno "Concluded".
- 143 **tüm internet trafiğinin dörtte biri**: Stephen Ludin, "Akamai: Why a Quarter of the Internet Is Faster and More Secure than the Rest" dersinden, 19 Mart 2014, International Computer Science Enstitüsü, Berkeley, California. Akamai kendi sitesinde şöyle demektedir: "Akamai web trafiğinin yüzde 15 ila 30 arasındaki bölümünü sağlamaktadır" (http://www.akamai.com/html/about/facts_figures.html).
- 145 **"Mesafenin önemli olduğuna..."**: Ludin, "Akamai."
- 145 **her türden insan yapımı düzenlemeden uzak durur**: Amazon'un "kaotik saklama" sistemi şurada anlatılmaktadır: <http://www.ssi-schaefer.de/blog/en/order-picking/chaotic-storage-amazon/>.
- 146 **Amazon yakın zamanlarda... patent aldı**: Ön kargolama hakkındaki patent No. 8,615,473, tarihi de 24 Aralık 2013 tür. "Method and system for anticipatory package shipping", Joel R. Spiegel, Michael T. McKenna, Girish S. Lakshman ve Paul G. Nordstrom, Amazon Technologies şirketi adına.
- 146 **Patent, daha... siparişsiz paket gönderimi...**: Bkz. Connor Simpson, "Amazon Will Sell You Things Before You Know You Want to Buy Them," The Wire, 20 Ocak 2014, <http://www.thewire.com/technology/2014/01/amazon-thinks-it-can-predict-your-future/357188/>; Chris Matyszczyk, "Amazon to Ship Things Before You've Even Thought of Buying Them?," CNET, 19 Ocak 2014, <http://www.cnet.com/news/amazon-to-ship-things-before-youve-even-thought-of-buying-them/>.
- 146 **Netflix'ten alınan verilerle...**: Micah Mertes, "The United States of Netflix Local Favorites", 10 Temmuz 2011, <http://www.slacktory.com/2011/07/united-states-netflix-local-favorites/>.

- 147 **HD filmleri hafızada depolamak**: Netflix 2012 senesinde Akamai gibi şirketlere ödeme yapmaktan bıktığını ve kendi CDN'ini kurduğunu duyurdu. Bkz. Eric Savitz, "Netflix Shifts Traffic to Its Own CDN", Forbes, 5 Haziran 2012, <http://www.forbes.com/sites/ericsavitz/2012/06/05/netflix-shifts-traffic-to-its-own-cdn-akamai-limelight-shrs-hit/>. Daha fazla bilgi için <https://www.netflix.com/openconnect>
- 147 **"Önbelleklemeyi her zaman yapmakta olduğumuz için çok bariz bir işlemdir"**: John Hennessy, kişisel görüşmelerden, 9 Haziran 2013.
- 148 **"Koşu ve spor malzemelerimi dış kapının yanındaki dolaba yakın bir yerde sepette bulunduruyorum"**: Morgenstern, "Organizing from the Inside Out".
- 148 **"yedek elektrikli süpürge torbalarımı"**: Jones, "Keeping Found Things Found".
- 149 **arama motorları üzerine çalışan**: Bkz. Belew, "Finding Out About".
- 149 **dilsiz uşak kullanmayı önerdi**: Rik Belew, kişisel görüşmelerden, 31 Ekim 2013.
- 149 **"benim yöntemimdeki temel prensip"**: Yukio Noguchi, kişisel görüşmelerden, 17 Aralık 2013.
- 150 **"süper" dosyalama sistemi**: Noguchi'nin dosyalama sistemi "Super Organized Method" isimli kitabında anlatılmaktadır ve ilk olarak William Lise'in çevirmenliği ile İngilizce olarak basılmıştır. Sistemi anlatan blog paylaşımı artık Lise'in web sitesinde mevcut değildir ama <https://web.archive.org/web/20031223072329> ve [/http://www.lise.jp/honyaku/noguchi.html](http://www.lise.jp/honyaku/noguchi.html) internet arşivlerinden erişilebilir. Daha fazla bilgi için bakınız Yukio Noguchi kişisel görüşmelerden, 17 Aralık 2013.
- 151 **kendi kendini düzenleyen listeler**: Sleator ve Tarjan, "Amortized Efficiency of List Update and Paging Rules".
- 152 **"Eğer isterseniz buna Tanrı'nın algoritması ya da gökyüzündeki algoritma diyebilirsiniz"**: Robert Tarjan, kişisel görüşmelerden, 17 Aralık 2013.
- 152 **Eğer LRU prensibini takip ederseniz**: LRU prensibinin kendi kendini düzenleyen listelere uygulaması olan bu uygulama, Öne Doğru İlerle Algoritması olarak bilinir.

- 152 **sadece verimli olmadığını:** Bu sizin kategorize etme konusunda tamamen pes etmeniz gerektiği anlamına gelmez. Eğer nesneleri biraz daha düzenlemek ve süreci hızlandırmak isterseniz Noguchi, farklı kategoriye giren dosyalara farklı renkte etiket takmanızı öneriyor. Bu şekilde örneğin mali kayıtları arıyorsanız aramanızı doğrudan bu alanda sınırlandırabilirsiniz. Ve burada da nesneler yine her kategori içinde Öne Doğru İlerle kuralına göre sıralanmış olacaktır.
- 154 **üniversite kütüphanelerinin bilgi alma sistemleri:** Anderson'un insan hafızası hakkındaki bulguları Anderson ve Milson, "Human Memory" çalışması içinde ve "The Adaptive Character of Thought" isimli kitapta yer almıştır. Bu kitap ideal çözümler açısından günlük algılarını analiz için strateji belirlemede etkili olmuştur ve Tom ile birçok kişinin araştırmalarında kullanılmıştır. Anderson ve Milson'ın "Human Memory" çalışması ise Burrell'in "A Simple Stochastic Model for Library Loans" çalışmasında yer alan kütüphaneden ödünç alma işinin istatistiğini kullanmaktadır.
- 154 **zihin hakkındaki çalışmaların eksik parçasını:** Anderson'un bilgisayarların bilgiyi bulup çıkarması ile insan hafızasının düzeni arasındaki ilişkiler konusundaki ilk araştırmaları birçok insanın henüz bilgi çağırma işlemiyle meşgul olmadığı bir dönemde icra edilmişti ve kullanımdaki sistemler de oldukça ilkel. Arama motoru araştırması bilgi çağırma sistemlerinin neler yapabileceğinin sınırlarını zorladıkça zihinler ve makineler arasındaki benzerlikleri keşfetmek için yeni fırsatlar yarattı. Örneğin, Tom ve meslektaşları Google'ın PageRank algoritmasının ardındaki fikrin insanın semantik hafızasını anlamayla ilişkili olduğunu göstermiştir. Bkz. Griffiths, Steyvers ile Fire, "Google and the Mind".
- 154 **"tam da gözlerimin önünde":** Anderson, "The Adaptive Character of Thought".
- 155 **üç ayrı insan çevresini analiz etti:** İnsan hafızasının çevresinin analizi Anderson ve Schooler'in "Reflections of the Environment in Memory" çalışmasında yer almaktadır.
- 155 **gerçek yaşamın da... istatistiksel bir yapısı mevcuttu:** "Human memory mirrors, with a remarkable degree of delity, the structure that exists in the environment." a.g.e.
- 156 **"insan zihninin başarması gereken göreve gereken saygıyı göstermemektedir":** a.g.e.

- 157 **“Kitap aslında büyük bir sıkıntıdır”**: Sözün Yunanca orijinali “μέγα βιβλίον μέγα κακόν” aynı zamanda “büyük bir kitap büyük bir şeytandır” şeklinde de çevrilebilir. O zamanlar kitapların rulolar hâlinde oldukları düşünülürse muhtemelen büyük kitaplar sıkıntı anlamına gelmekteydi. Alıntı yapmanın ve atıfta bulunmanın numaralandırılmış sayfalar şeklinde kitaplar basılana kadar başlamamasının bir nedeni vardır. Bu konudaki tarihçe hakkında çok daha iyi bilgiler için bkz. Boorstin, “The Discoverers”.
- 157 **“Eğer bir şehri daha büyük bir şekilde inşa ederseniz”**: John Hennessy, kişisel görüşmelerden, 9 Ocak 2014.
- 158 **bir hafıza kaçınılmaz olarak...**: Ramscar ve diğerleri, “The Myth of Cognitive Decline”.
- 160 **“zihinlerinin doğal birer bilgi işlem cihazları olduğunu”**: Michael Ramscar, “Provider Exclusive: Michael Ramscar ‘Myth’ of Cognitive Decline”, Bill Myers ile görüşmeden, 19 Şubat 2014. <http://www.providermagazine.com/news/Pages/0214/Provider-Exclusive-Michael-Ramscar-On-The-Myth-Of-Cognitive-Decline.aspx>.

5. Çizelgeleme (Scheduling)

- 161 **“Günlerimizi nasıl geçirdiğimiz,...”**: Dillard, “The Writing Life”.
- 161 **“Tıpkı savaş gibi...”**: Lawler, “Old Stories”.
- 162 **“Bizler sürekli tekrarladığımız şeyden ibaretiz”**: Aslında bu ifade genellikle Aristo’ya atfedilmektedir. Bkz. Durant, “The Story of Philosophy”.
- 162 **iki dakika ya da daha kısa sürecek**: Allen, “Getting Things Done”.
- 162 **en zor görevden işe başlama**: Tracy, “Eat That Frog!” Kitap, Mark Twain’in şu sözünü açıkladığı için başlığına yakışır bir isim almıştır: “Sabah ilk iş olarak canlı bir kurbağa yerseniz günün kalanında başınıza daha kötü bir şey gelmez.” Fakat sözlerin sahiplerini araştıran site olan *The Quote Investigator* bu sözü 18’inci yüzyıl Fransız yazarı Nicolas Chamfort’a atfeder. <http://quoteinvestigator.com/2013/04/03/eat-frog/formore>.
- 162 **sosyal işlerini ve boş zamanlarını planlamasını**: Fiore, “The Now Habit”.
- 162 **“tamamlanmamış bir işe saplanıp kalmak”**: William James, Carl Stumpf’a yazılan bir mektuptan, 1 Ocak 1886.
- 162 **kasıtlı olarak bir şeyleri hemen yapmamayı**: Partnoid, “Wait”.

- 163 **Gantt şeması:** Taylor ile Gantt'ın çizelgeleme alanının tarihindeki rolü Herrmann'ın "The Perspectives of Taylor, Gantt and Johnson" çalışmasında özetlenmiştir. Taylor hakkında ilave biyografi detayları için bkz. Kanigel, "The One Best Way".
- 163 **Amazon, IKEA ve SpaceX gibi şirketlerdeki:** Gantt şeması yazılım şirketi LiquidPlanner bu şirketlerin müşterileri arasında olduğundan övünçle bahsetmektedir. <http://www.liquidplanner.com/death-to-gantt-charts/> .
- 163 **ilk ipucu:** Johnson'ın seminer çalışması sonucu, "Optimal Two-and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included" isimli çalışmada yer almaktadır.
- 164 **En kısa yıkamayla başla, en kısa kurutmayla bitir:** Earliest Due Date (EDD), aynı zamanda Jackson Kuralı olarak da bilinir. Jackson, "Scheduling a Production Line to Minimize Maximum Tardiness".
- 167 **Moore Algoritması:** Moore, "An N Job, One Machine Sequencing Algorithm for Minimizing the Number of Late Jobs." Moore çalışmada kendisine J. Hodgson tarafından önerilen bir sadeleştirme ve optimizasyon kullandığını da belirtmektedir. Günümüzde Moore Algoritması, Hodgson Algoritması ve Moore-Hodgson Algoritması birbirlerinin yerine kullanılan ifadelerdir.
- 169 **her zaman elinizde mevcut en kısa işi bitirin:** Shortest Processing Time (SPT) ya da Smith Kuralı tamamlanma sürelerinin toplamını minimize etmeyi göstermektedir. Smith, "Various Optimizers for Single-Stage Production".
- 170 **hayvanların yiyecek arama eylemlerinde de:** Stephens ve Krebs, "Foraging Theory".
- 171 **"borç kartopu":** Popüler dünyada yazar ve konuşmacı Dave Ramsey belki de "borç kartopu" stratejisinin en tanınmış temsilcisi ve taraftarıdır ve çok fazla destekçinin yanı sıra karşıt da kazanmıştır. Akademik yönden bakacak olursak Northwestern'den işletme bölümü araştırmacıları Gal ile McShane tarafından yazılan "Can Small Victories Help Win the War?" ve 2014 senesinde Texas A&M Brown and Lahay'den ekonomistlerin yazdığı "Small Victories" insanların tüketici borçlarından kurtulmalarına yardımcı küçük zaferlerin etkilerini incelemişlerdir.
- 172 **takıntılı bir vampir:** Bahsi geçen bölüm 5'inci sezon 12'nci bölüm olan ve ilk olarak 22 Şubat 1998'de yayınlanan "Bad Blood"tur.

- 172 **“eylemde bulunma anlamına gelen seçeneği”**: Rosenbaum, Gong ile Potts, “Pre-Crastination”.
- 175 **“Eğer yanıcı bir maddeyseniz ve ayaklarınız varsa...”**: Hedberg’in hikâyesi 1999 senesindeki komedi albümü Strategic Grill Locations’ta bulunabilir.
- 175 **Reeves “zaman baskıları” konusundaki bugları... suçlayacaktı**: Bu bilgi 15 Aralık 1997 tarihli Glenn Reeves’ten meslektaşlarına “What really happened on Mars?” konulu ve http://research.microsoft.com/en-us/um/people/mbj/Mars_Pathfinder/Authoritative_Account.html adresinde bulunan bir e-postadan alınmıştır.
- 176 **“En önemli şeyler...”**: Bu sözün ilk ortaya çıkışı Cove’nin “How to Succeed with People” çalışması gibi görünmektedir ve burada söz Goethe’ye atfedilmiştir.
- 176 **“Ben her gün günlük işlerimi bu şekilde yürütmekteyim”**: Laura Albert McLay, kişisel görüşmelerden, 16 Eylül 2014.
- 176 **“Gene,... bir şeyi ertelemekteydi”**: Jan Karel Lenstra, kişisel görüşmelerden ve yazışmalardan, 2 Eylül 2014.
- 177 **Lawler kariyerinde oldukça dolambaçlı bir yolda**: Lawler’in biyografisi Lawler’in “Old Stories” ve Lenstra’nın “The Mystical Power of Twoness” çalışmalarından alınmıştır.
- 177 **“sosyal bilinci”**: Richard Karp, “A Personal View of Computer Science at Berkeley,” California Üniversitesi, Berkeley, http://www.eecs.berkeley.edu/BEARS/CS_Anniversary/karp-talk.html.
- 177 **adına bir ödül**: Bkz. <http://awards.acm.org/lawler/>.
- 178 **çizelgeyi sondan başa doğru...**: Lawler’in maksimum gecikme problemi için öncüllük kısıtları analizi, “Optimal Sequencing of a Single Machine Subject to Precedence Constraints.”
- 179 **çizelgeleme teorisinin tam bir haritasını ortaya koymak**: bu çalışma 1975 senesinde bir öğleden sonra Lawler, Lenstra ile meslektaşları Richard Karp ve Ben Lageweg Amsterdam’daki Mathematisch Centrum’da çizelgeleme teorisi üzerine konuştukları sırada ortaya çıktı. Belki de bunun nedeni hemen yanı başlarındaki Amstel birasının mayasından gelen kokuydu. Bu gruba tüm çizelgeleme problemlerinin bir listesini ve bunların çözülüp çözülmediklerini içeren bir kitabın kendi tezini savunmak üzere olan arkadaşları Alexander Rinnooy Kan için iyi bir hediye olacağını bir şeyler ilham verdi (Bu hikâye Lawler’in “Old Stories” ve Lenstra’nın “The Mystical Power of

Twoness” çalışmalarında yer almaktadır). Rinnooy Kan sadece akademik dünyaya değil aynı zamanda ING Bankası yönetim kurulunda yer alarak Hollanda ekonomisine de önemli katkılarda bulunacaktı. Hollanda’daki en etkili isim olarak De Volkskrant gazetesi tarafından üç sene üst üste Kan seçildi. Bkz. “Rinnooy Kan weer invloedrijkste Nederlander”, De Volkskrant, 4 Aralık 2009, <http://nos.nl/artikel/-112743-rinnooy-kan-weer-invloedrijkste-nederlander.html>.

Lageweg listeyi oluşturan ve çizelgeleme probleminin 4.536 farklı permütasyonunu sıralayan bir bilgisayar programı yazdı: Akıllarına gelen her türlü mümkün ölçütün (maksimum gecikme, geciken iş sayısı, tamamlanma zamanı toplamı vb.) ve kısıtların (ağırlıklar, öncelik, başlangıç zamanları vb.) birleşimi.

Çizelgeleme problemlerinin hayvanat bahçesi diyebileceğimiz şeyi tanımlama için örgütsel planları “Schedulese” dedikleri kısaltmalarla dolu bir dildi (Graham ve diğerleri, Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing). Buradaki temel düşünce çizelgeleme problemlerinin üç değişkenle tanımlanmasıdır: Mevcut makinelerin doğası, işlerin doğası ve de çizelgelemenin amacı. Bu üç değişken bu sıra ile, öncelik kısıtları, boş kalma zamanları ve de amaç gibi faktörleri tanımlayan kodlar ile tanımlanır. Örneğin $1|r_j|\Sigma C_j$ gösterimi; tek bir makineyi, serbest kalma zamanlarını ve de tamamlanma zamanlarının toplamını minimize etme amacını gösterir. Eugene Lawler şöyle demektedir:

Hemen elde edilen bir faydası, problem türleri hakkında iletişim kurabileceğimiz bir rahatlık elde etmektir. Ofislerimize gelen ziyaretçiler bazen şunun gibi şeyler duyduklarında şaşımaktadırlar: “ $1|I_rj|I$ Toplam C_j ’nin NP-zor olması, bir ön alımlı $1|I_rj|I$ Toplam C_j ’nin de NP-zor olduğu anlamına da mı gelir?” “Hayır, unuttun mu, bu kolaydı?” “Peki, $1|I|dj|I$ Toplam C_j kolaydır ve bu da ön alımlı $1|I|dj|I$ Toplam C_j olduğunu gösterir; peki ön alımlı $1|I|dj|I$ Toplam C_j hakkında ne biliyoruz?” “Hiçbir şey.”

(Formal gösterimde: “ $1|r_j|\Sigma C_j$ ’nin NP zor olması, $1|pmtn, r_j|\Sigma C_j$ ’nin zor olduğu anlamına mı gelir?” “Hayır, unuttun mu, bu kolaydı?”

“Peki, $1|dj|\Sigma C_j$ kolaydır ve bu ön alımlı $1|pmtn, dj|\Sigma C_j$ olduğunu gösterir; peki $1|pmtn, r_j, dj|\Sigma C_j$ hakkında ne biliyoruz?” “Hiçbir şey” [Lawler ve diğerleri, “A Gift for Alexander!”, ayrıca bakınız “Old Stories”]

- 179 **problem çözülemez hâle gelir:** Aslında bir alanın nasıl doldurulacağına ilişkin bilgisayar bilimi dünyasının en ünlü çözümsüz problemi olan “sırt çantası” problemine denktir. İki problem türü arasındaki bağlantı Lawler’ın “Scheduling a Single Machine to Minimize the Number of Late Jobs” çalışmasında yer alır.
- 179 **bazı işlere başlamak için:** Bizim “başlangıç zamanları” dediğimiz şey literatürde “serbest bırakma zamanı” olarak geçmektedir. Lenstra, Rinnooy Kan ile Brucker; “Complexity of Machine Scheduling Problems” çalışmalarında hem tamamlanma zamanlarının toplamını minimize edilmesinin hem de en büyük gecikmenin minimize edilmesinin NP zorlukta olduğunu gösterdiler.
- 179 **Son zamanlarda yapılan bir araştırma:** Lawler ve diğerleri, “Sequencing and Scheduling”. Bu listenin en güncel hâli için bkz. <http://www.informatik.uni-osnabrueck.de/knust/class/>.
- 180 **kolaylaştırabilen tek bir dokunuş:** En büyük gecikmeyi minimize etme üzerindeki etkiler, Baker ve diğerlerinin “Preemptive Scheduling of a Single Machine” çalışmasında analiz edilmiştir. Tamamlanma sürelerinin toplamalarının minimize edilmesi problemi Schrage’ın “A Proof of the Optimality of the Shortest Remaining Processing Time Discipline” çalışması ile Baker’ın “Introduction to Sequencing and Scheduling” çalışmasında incelenmiştir.
- 181 **En Erken Teslim Tarihi’nin ön alma versiyonudur:** Beklenen en büyük gecikmeyi en erken teslim tarihi olan işi seçerek minimize etmenin sonucu Pinedo’nun “Scheduling” çalışmasında anlatılmaktadır.
- 181 **En Kısa İşlem Süresinin ön alma versiyonu:** Dinamik bir ortamda ağırlıklı tamamlanma zamanlarının toplamını minimize etmek için ağırlıklı en kısa beklenen işlem süreleri olan işi seçmenin etkinliği (bir işin tamamlanma zamanının onun üzerinde çalışırken daha fazla uzamadığı varsayıldığında) Sevcik tarafından “Scheduling for Minimum Total Loss Using Service Time Distributions” isimli çalışmada dinamik çizelgelemenin daha genel bir stratejisinin bir parçası olarak gösterilmiştir.
- 182 **bu işlerin ağırlıklı gecikme süre toplamlarını:** Pinedo’nun “Stochastic Scheduling with Release Dates and Due Dates” çalışması, bu algoritmanın bu türden problemler için optimal olduğunu göstermiştir. Stokastik çizelgelemede optimal algoritmalar her iş için ideal ol-

mak zorunda değildir ama alakalı ölçütlerin beklenen değerlerini minimize eder.

- 182 **“‘Plan’ kelimesi yerine ‘tahmin’ kelimesini kullanın”**: Jason Fried, “Let’s just call plans what they are: Guesses”, 14 Temmuz 2009, <https://signalvnoise.com/posts/1805-lets-just-call-plans-what-they-are-guesses>.
- 183 **“Trenden inmemelisiniz”**: Ullman, “Out of Time”.
- 184 **hem gecikme hem de hatalar içerebildiğini**: Monsell, “Task Switching”.
- 184 **“sadece hataları düzeltirim”**: Kirk Pruhs, kişisel görüşmelerden, 4 Eylül 2014.
- 185 **“İlgimin bir kısmı, minimum miktarı sizindir”**: Sosyal Ağ, Aaron Sorkin’in yapımcılığını yaptığı film; Columbia Pictures, 2010.
- 186 **“Hiç kimse bunun hakkında bir şey bilmiyordu”**: Peter Denning, kişisel görüşmelerden, 22 Nisan 2014.
- 186 **“birden tüm sistem çöker”**: Denning, “Thrashing: Its Causes and Prevention”.
- 187 **“Önbellekler mevcut iş yükleri için sıcaktırlar ve...”**: Peter Zijlstra, kişisel görüşmelerden, 17 Nisan 2014.
- 187 **durma noktasına geldiği**: Thrashing aynı zamanda veritabanlarına erişmek için birbirleriyle yarışan farklı süreçlerin aralarındaki yarışın, sistemin hiçbir şey yapamayacak şekilde tıkanmasına neden olabildiği veritabanı sistemlerinde de olabilir. Thrashing benzer şekilde ağ kanalları için yarışan farklı sinyallerin sonuçta hiçbir şeyin geçmesine izin vermediği ağ sistemlerinde de görülebilir. Bu ikinci senaryoya 10’uncu bölümde daha yakından bakacağız.
- 189 **planlayıcılarını... değiştirdi**: Linux tarafından kullanılan ve 2001 senesinde Linux 2.4 ile başlayan “ $O(n)$ Scheduler” tüm süreçleri önceliklerine göre ayırmaktaydı ve bu, süreçlerden daha uzun sürmekteydi. Bu durum, tüm süreçleri sayısı önceden belirlenmiş kovalara ayıran sıralama sistemine sahip olan ve Linux 2.6 ile çalışan “ $O(1)$ Scheduler” ile değişti. Burada kaç tane süreç olduğunun bir önemi yoktu. Ancak bu işlemi yapmak karmaşık sezgisel hesaplamalar gerektirmekteydi ve 2007 senesinde Linux 2.6.23 ile birlikte “ $O(1)$ Scheduler” daha sade ve basit işleyen “Completely Fair Scheduler” ile değiştirildi.

- 190 **Linux'ta bu minimum faydalı dilim:** Bu değer Linux'un çekirdeğinin "Completely Fair Scheduler"de `sysctl_sched_min_granularity` değişkeninde tanımlanmıştır.
- 191 **"zaman kutusu (timeboxing)" ya da "Pomodoro Tekniği (Pomodoros)" gibi yöntemler:** Zaman kutusu hakkında yazılım geliştirme ekiplerinin yönetimi kapsamında çok şey yazılmıştır ve bu terimin Zahniser'in "Timeboxing for Top Team Performance" çalışmasıyla ortaya çıktığı bilinmektedir. İsmi domates şeklindeki bir mutfak zamanlayıcısından gelen "Pomodoro Technique" (pomodoro İtalyancada domates kelimesine karşılık gelmektedir) 1980'lerin sonlarında Francesco Cirillo tarafından geliştirilmiş ve 1998'den itibaren Cirillo tarafından anlatılmıştır. Bkz. Cirillo, "The Pomodoro Technique".
- 192 **programlamacıları psikoloji alanına yönelmiş ve...:** Peter Zijlstra, kişisel görüşmelerden, 17 Nisan 2014.
- 193 **Bilgisayarların kendileri buna benzer bir sistem geliştirirler:** Linux 2007 senesinde zamanlamaya destek ilave etti, Microsoft bunu 2009 senesinde Windows 7'den itibaren ekledi ve Apple bunu 2013 senesinde OS X Mavericks ile izledi.
- 193 **"sadece bir satırlık bir hata":** Peter Norvig, kişisel Görüşmelerden, 17 Eylül 2014.
- 194 **"Ben sürekli olarak görev değiştirmem":** Shasha ve Lazere, Out of Their Minds, 101.
- 194 **"benim işim altlarda":** Donald Knuth, "Knuth versus Email", <http://www-cs-faculty.stanford.edu/~uno/email.html>.

6. Bayes Kuralı (Bayes Rule)

- 195 **"İnsanlığın tüm bilgisi belirsiz, eksik ve kısımidir":** Bertrand Russell, Human Knowledge: Its Scope and Limits, 1948, sf. 527.
- 195 **Berlin Duvarı'nı gördü:** Gott, "Implications of the Copernican Principle for Our Future Prospects".
- 196 **"Verinin Akıl Almaz Etkinliği":** Konuşma Halevy, Norvig ile Pereira'dan alınmıştır "The Unreasonable Effectiveness of Data".
- 196 **"bu argümanlar sadece olası olmalıdır":** An Enquiry Concerning Human Understanding, §IV, "Sceptical Doubts Concerning the Operations of the Understanding".

- 197 **Bayes'in kendi geçmişi:** Bkz. Dale, "A History of Inverse Probability and Bellhouse", "The Reverend Thomas Bayes"
- 197 **Ve de 1746, 1747, 1748 ya da 1749 da:** Bayes'in tarifi olmayan efsanevi çalışması 1746 ila 1749 arası yapılmıştır. Bkz. McGrayne, The Theory that Would Not Die.
- 197 **Newton'ın yeni ortaya koymuş olduğu "Calculus":** An Introduction to the Doctrine of Fluxions and Defence of the Mathematicians against the Objections'ın yazar analizi, genel Mantıksal yöntemlerini etkilemek üzere atandıkları sürece.
- 198 **"çalışma çok değerliydi ve korunmayı hak ediyordu":** "An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances".
- 198 **"kaç adet boş, kaç adet ödül":** A.g.e. ekleri.
- 198 **ilk olarak hipotezlerden ileriye doğru akıl yürütmemiz gerektiğini:** Daha da net olmak gerekirse Bayes eldeki h hipotezleri ve d verisi için bu hipotezleri $p(d/h)$ olasılığını hesaplayarak değerlendirmemiz gerektiğini iddia ediyordu. ($p(d/h)$ gösterimi eğer h doğru ise d gözlemlene olasılığı anlamına gelmektedir). Bunu h 'nin doğru olduğu duruma çevirmek istersek o zaman bu olasılıkların toplamına böleriz.
- 200 **Laplace 1749 senesinde Normandiya'da doğdu:** Laplace'ın hayatı ve çalışmaları hakkında daha fazla bilgi için bakınız: Gillispie, Pierre-Simon Laplace.
- 200 **tek bir beklenen değere:** Laplace Kuralı, Bayes tarafından önerilen hesaplamalar yapılarak elde edilir. Buradaki püf nokta, entegrasyonun eğlenceli bir uygulamasını içeren tüm hipotezlerdeki toplamdır. Laplace Kuralı'nın tam şekilde elde edilmesini Griffiths, Kemp ve Tenenbaum'un "Bayesian Models of Cognition" çalışmasında görebilirsiniz.
- 201 **Eğer sadece bir kez dener ve başarılı olursanız:** 2'nci bölümdeki çok kollu canavar ve araştır/kullan ikileminden hatırlanabileceği gibi bir kumar makinesi gibi bir sürecin başarı oranının tecrübelere dayalı tahminlerine değinmiştik. Bayes ve Laplace'ın çalışmaları aralarında Gittins İndeksinin de olduğu, o bölümde tartışmış olduğumuz algoritmaların doğruluğunu desteklemektedir. Laplace Kuralı gibi Gittins İndeksinin değerleri herhangi bir başarı olasılığının eşit şekilde benzer olduğunu ileri sürmektedir. Bu durum 1-0 geçmişe sahip bir kumar makinesinin beklenen genel kazanma değerini $2/3$ yapmaktadır.

- 202 **“Tüm bu öneriler tutarlı ve anlaşılabilir. Neden daha tutarlı ya da anlaşılabilir olmayan birine öncelik verelim?”**: An Enquiry Concerning Human Understanding, §IV, “Sceptical Doubts Concerning the Operations of the Understanding.”
- 203 **işin çok büyük kısmı Laplace tarafından yapılmış olmasına karşın**: 1950 senesinde Bailey tarafından yazılan etkili bir çalışma olan *Credibility Procedures* “Laplace’ın Bayes Kuralını genelleştirmesi” diye bahsetmiştir lakin kabul görmemiştir. Kendisini bulan kişiden ziyade başka birinin adıyla anılan buluşlar hakkında bir tarihçi ve istatistikçi olan Stephen Stigler, bunların bir kural olarak ele alınması gerektiğini ileri sürmüştür: “Stiglerin Kişilerin İsmi Verme Kuralı.” Elbette Stigler bunu bulan ilk kişi değildi, Stigler bu konunun hakkını Sosyolog Robert K. Merton’a vermektedir. Bkz. Stigler, “Stigler’s Law of Eponymy”.
- 203 **olasılıklarını birbirleriyle çarpın**: Matematik konusunda bilgisi az olanlar için Bayes Kuralının tamamı şu şekildedir. h hipotezi için d veri setinde bir olasılık hesaplamak istiyoruz. Bu hipotezin $p(h)$ dağılımı dâhilinde doğru olduğuna dair geçmiş tecrübelerden edinmiş olduğumuz bir inancımız var. Hesaplamak istediğimiz şey bir dağılım olan $p(h/d)$ ’dir. Yani d ile sağlanan kanıtlar ışığında ilk dağılımı nasıl güncellememiz gerektirir.
- $$p(h|d) = \frac{p(d|h)p(h)}{\sum_{h'} p(d|h')p(h')}$$
- 204 **“Özellikle gelecek söz konusu olduğunda...”**: Bu sözün kesin olmayan kaynağı detaylı bir şekilde Quote Investigator’da açıklanmaktadır: “It’s Difficult to Make Predictions, Especially About the Future”, <http://quoteinvestigator.com/2013/10/20/no-predict/>.
- 206 **New York şehri yerinde duruyor ise şaşırtıcı bir durum olacaktır**: Richard McGuire’ın *The New Yorker* dergisinin kapağı, “Time Warp”, 24 Kasım 2014. Şehirler ve kuruluşların olası yaşam sürelerinin büyüleyici ve daha detaylı bir analizi için bkz. Geoffrey West ve Luis Bettencourt’un çalışmaları, Bettencourt ve diğerleri, “Growth, Innovation, Scaling, and the Pace of Life in Cities”.
- 206 **pek çok eleştiri geldi**: Bkz. Garrett ve Coles, “Bayesian Inductive Inference and the Anthropic Principles” ve Buch, “Future Prospects Discussed”.

- 207 **hiçbir şey bilmediğimizi:** İstatistikçi Harold Jeffreys daha sonraları Laplace'ın $(w+1)/(n+2)$ önermesi yerine $(w+0,5)/(n+1)$ 'i kullanmayı önerecektir ve bu da “tekdüze” bir öncülden ziyade “bilgiye dayanmayan” bir öncül kullanmaktan kaynaklanmaktaydı (Jeffreys, Theory of Probability; Jeffreys, “An Invariant Form for the Prior Probability in Estimation Problems”). Daha fazla bilgiye dayalı öncül tanımlamanın bir yolu; w ve n 'nin eski tecrübelerinizdeki benzer kazanma ve deneme sayıları olduğu $(w+w'+1)/(n+n'+2)$ formunda ortaya çıkar. (Detaylar için bkz. Griffiths, Kemp ve Tenenbaum, “Bayesian Models of Cognition”). Bu kuralı kullanarak, önceden eğer sadece 10 biletin kazandığı 100 çekiliş gördüyseniz ($w = 10$, $n = 90$), bir kazananın sonra olan tahmininiz $12/103$ çok daha makul olacak ve yüzde 10'dan çok farklı olmayacaktır. Laplace kuralının değişik türleri, daha öne hiç karşılaşılmamış kelimelerin olasılıklarının hesaplandığı hesaplama dillerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Chen ve Goodman, “An Empirical Study of Smoothing Techniques for Language Modeling”).
- 207 **bir milyon yıl boyunca:** 0 ile sonsuz arasında değişen böylesi bir süre için t zamanındaki bilgisiz öncülün olasılık yoğunluğu $p(t) = 1/t$ dir. Ölçeği değiştirmek $-t$ 'nin katı olan yeni bir s değeri tanımlamak dağılımın şeklini değiştirmez: Eğer $s = ct$ ise o zaman $p(s) = p(t=s/c) = 1/s$ olur. Bu konuda çok daha fazla bilgi için Jeffreys, “Theory of Probability” ve Jeffreys, “An Invariant Form for the Prior Probability in Estimation Problems”.
- 208 **Kopernik Prensibi ortaya çıkar:** Buch'un “Future Prospects Discussed” çalışmasına cevaben Gott, “Future Prospects Discussed,”
- 208 **bir şehirdeki tramvay vagonlarının sayısını belirleme:** Jeffreys, Theory of Probability, §4.8. Jeffreys matematikçi Max Newman'ı bu problemi fark etmesini sağladığı için anmaktadır.
- 208 **tankların sayısını hesaplamaya çalışırken:** Bu problem “Alman Tank Problemi” olarak adlandırılmıştır ve birçok kaynakta belgelenmiştir. Bkz. Gavyn Davies, “How a Statistical Formula won the War”, the Guardian, 19 Temmuz 2006, <http://www.theguardian.com/world/2006/jul/20/secondworldwar.tvandradio> .
- 209 **bir meyve bahçesindeki meyvelerin çapına kadar:** 2002 Yeni Zelanda Avocado Yetiştiricileri Yıllık Raporu “Nisan ayı itibariyle normal dağılım gözlemlendiğini” tespit etmiştir.

- 209 **bir kasabanın ortalama nüfusu:** Bu sayı Clauset, Shalizi ve Newman'ın "Power-Law Distributions in Empirical Data" çalışmasından gelmektedir.
- 209 **birçok ölçek üzerinde değişebilen:** Kuvvet yasası dağılımının genel formu t değeri üzerinde $p(t) = t^{-y}$ dir ve y 'nin olasılığının t büyüdükçe ne kadar hızlı bir şekilde azaldığını tanımlar.
- 210 **kuvvet yasalarının çok olduğu alanlardır:** Varlıkların bir kuvvet yasası dağılımına göre dağıldığı gözlemi Pareto'nun "Cours d'économie politique" çalışmasına atfedilmektedir. Bu konudaki diğer iyi çalışma için bkz. Simon, "On a Class of Skew Distribution Functions".
- 210 **Amerika'daki ortalama gelir:** IRS belgelerinden alınmış kişi başına düşen GSYİH'nın 2009 vergi senesi için 55.688 dolar olması beklenmiştir. Bkz. 2011 tarihli çalışma: "Evaluating the Use of the New Current Population Survey's Annual Social and Economic Supplement Questions in the Census Bureau Tax Model", https://www.census.gov/content/dam/Census/library/working-papers/2011/demo/2011_SPM_Tax_Model.pdf.
- 210 **ABD nüfusunun üçte ikisi bu değer altında gelire sahipken:** GSYİH'nın yüzde 40'lık dilimi için alt değeri 2012 de 47.475 dolar ve yüzde 30'luk dilimi için ise 63.222 dolardı ve buradan da 55.688 dolarlık GSYİH'nın üstteki yüzde 33'lük kesime karşılık geldiğini söyleyebiliriz. Bkz. Adrian Dungan, "Individual Income Tax Shares, 2012," IRS Gelir Bülteni İstatistikleri, 2015, <https://www.irs.gov/pub/irs-soi/soi-a-ints-id1506.pdf>.
- 210 **en üst yüzde 1'lik dilimde kazananlar ise bu ortalama rakamın neredeyse 10 katı kadar kazanmaktadır:** Üst yüzde 1'lik dilim için alt değer 2012'de 434.682 dolardı ve üst yüzde 0,01'lik kesim için bu rakam 12.104.014 dolardı. A.g.e.
- 210 **"ayrıcılık ek":** Buradan kaynaklanan kuvvet yasası dağılımlarına ilişkin iyi bir çalışma için bkz. Barabási, „Linked“.
- 211 **"Bu sonsuza kadar sürebilir" derken iyi bir şey mi kast ettiniz?:** Lerner, "The Lichtenberg Figures".
- 211 **uygun tahmin stratejisinin:** Bu bölümde bahsedilen tüm tahmin kuralları Griffiths ve Tenenbaum'un "Optimal Predictions in Everyday Cognition" çalışmasından alınmıştır.

- 213 **şiiirlerin normal dağılımdan çok kuvvet yasası dağılımına daha yakın bir dağılıma uyduğunu:** a.g.e.
- 213 **bağımsız olaylar arasındaki zaman aralıklarının dağılımlarını biçimlendirmiştir:** Erlang ilk olarak Poisson dağılımını kullanarak bir telefon şebekesindeki aramaları “The theory of Probabilities and Telephone Conversations” çalışmasında modellemiştir ve sonrasında gelen aramalar arasındaki zaman aralığını kendi adını alacak şekilde “Solution of Some Problems in the Theory of Probabilities of Significance in Automatic Telephone Exchanges” isimli çalışmasında modellemiştir. Erlang’ın yaşamı hakkında daha fazlası için bkz. Heyde, “Agner Krarup Erlang”.
- 214 **oranlar 20’de 1 gibidir:** Kesin olarak ifade etmek gerekirse, 21 oyununda oran tam olarak 2.652’de 128’dir ya da 20,7 de 1. Neden kazanmadan önce 20,7 el oynamayı beklememiz gerektiğinin nereden geldiğini anlamak için beklentimizi şöyle anlatabiliriz: Ya oyundaki elimizde 1 olur ya da olmaz (başlangıca geri döneriz). Eğer beklentimiz x ise $x=1+(2524/2652)x$ ’tir ve bu denklemdeki oran elimize 21 gelmeme olasılığıdır. Bu denklem çözüldüğünde $x=20,7$ olur.
- 214 **istatistikçiler tarafından “hafızasız” olarak bilinir:** Teknik olarak bir sonraki 21 eli için olan dağılım ana metinde açıkladığımız kanat benzeri Erlang dağılımı yerine geometrik bir dağılımdır (sürekli bir değer için olan üstel dağılıma benzer bir dağılım) ve sürekli olarak azalır. Fakat doğru şartla gerçekleştiğinde her ikisi de hafızasız tahminler üretebilir. Eğer rastgele bir anda belirli bir olgu ile karşılaşsak (Gott’un Berlin Duvarı örneğindeki gibi) kanat şekline benzeyen Erlang dağılımı bize hafızasız ekleme kuralını verir. Ve eğer sürekli olarak geometrik dağılımlı bir olguyu gözlemlersek (21 oyunundaki gibi) aynı sonuçları alırız.
- 217 **Kenny Rogers... tavsiyesinde bulunmaktadır:** “The Gambler” en çok 1978 senesinde aynı isimle Kenny Rogers tarafından seslendirilmesiyle tanınmaktadır fakat ilk olarak Don Schlitz tarafından yazılmış ve seslendirilmiştir. Şarkının Rogers kaydı ülke listelerinde zirveye yerleşecek ve 1980 Grammy ödüllerinde en iyi erkek Country müzik ses performansı ödülünü alacaktır.
- 217 **“rahatlatıcı bir şekilde iç çektim”:** Gould, “The Median isn’t the Message”.

- 218 **tahminlerini sordukları bir deney:** Griffiths ve Tenenbaum, “Optimal Predictions in Everyday Cognition”.
- 220 **meşhur “Marshmallow Testi”:** Mischel, Ebbsen ile Rasko Zeiss, “Cognitive and Attentional Mechanisms in Delay of Gratification”.
- 220 **Eğer pes edeceksen neden eziyet çekmeden başta pes etmiyorsun ki?:** Pennsylvania Üniversitesi’nden Joe McGuire ve Joe Kable bir dizi çalışmayla insanların değiştiğini göstermişlerdir. Bkz. McGuire ve Kable, “Decision Makers Calibrate Behavioral Persistence on the Basis of Time-Interval Experience” ile McGuire ve Kable, “Rational Temporal Predictions Can Underlie Apparent Failures to Delay Gratification”.
- 221 **diğerlerinden daha başarılı genç yetişkinler:** Mischel, Shoda ile Rodriguez, “Delay of Gratification in Children”.
- 221 **eski tecrübelerin Marshmallow Testindeki davranışları nasıl etkileyebileceğini:** Kidd, Palmeri ile Aslin, “Rational Snacking”.
- 223 **Carnegie Hall salonunun yarısını bile dolduracak kadar değildir:** Havacılık Güvenlik Ağı’ndan olan kişilere göre ABD malı 12 kişiden fazla taşıma kapasitesi olan uçaklar 2000-2014 senesi arasında 1.369 idi ve 2015 sonuna doğru sayı 1.393 oldu. Carnegie Hall salonunun ünlü Isaac Auditoriumunun 2.804 kapasitesi vardır. Bkz. <http://www.carnegiehall.org/Information/Stern-Auditorium-Perelman-Stage/>.
- 224 **Wyoming’in toplam nüfusundan daha fazladır:** Ulusal Trafik Güvenlik Kurumuna göre 2000-2013 seneleri arasında ABD’de 543.407 kişi trafik kazalarında hayatını kaybetti. Bkz. <http://www-fars.nhtsa.dot.gov>. Bu rakamları kullanarak 2014 ve 2015 senelerini tahmin etmek suretiyle 2015 senesinde bu sayının 608.845 olması beklenir. ABD Nüfus İdaresi tarafından Wyoming’in 2014 senesi itibariyle nüfusunun 584.153 olduğu tahmini yapılmıştır. Bkz. <http://quickfacts.census.gov/qfd/states/56000.html>.
- 224 **silahlı şiddet haberleri:** Glassner, “Narrative Techniques of Fear Mongering”.

7. Fazla Uyum Sağlama (Overfitting)

- 225 **“Evlen-Evlen-Evlen Q.E.D.”:** Darwin’in 7 Nisan 1838 tarihine ait olduğu belirtilen bir not, bkz. Darwin, “The Correspondence of Charles Darwin”, Cilt 2: 1837–1843.

- 227 **“ahlaki ya da sağduyulu cebir”**: Franklin’in Joseph Priestley’e mektubu, Londra, 19 Eylül 1772.
- 228 **“Senin yapabildiğin bir şeyi senden daha iyi yaparım, herhangi bir şeyi senden daha iyi yapabilirim”**: Irving Berlin tarafından yazılmıştır, Annie Get Your Gun, 1946.
- 228 **Neyi bildiğiniz ve neyi bilmediğiniz**: Makine öğrenme konusunda çalışan araştırmacıların dilinde: “Eğitim” ve “Test”.
- 228 **Almanya’da son zamanlarda gerçekleştirilen**: Lucas ve diğerleri, “Reexamining Adaptation and the Set Point Model of Happiness”.
- 229 **bir çizgi formüle etmek**: Bu ilişkiyi kapsayan en iyi polinom fonksiyonunu bulmaya çalışmaktayız. Evlilik x ve memnuniyet y olduğu durumda tahminde kullanılabilecek bir model $y=ax+b$ ’dir ve ayrıca ikinci dereceden denklem ise $y=ax^2+bx+c$ ’dir. Dokuzuncu dereceden bulmak istersek ise bu model, x ’ten x^9 ’a kadar olan en iyi değerleri bize verir.
- 230 **her bir veri noktasından**: Aslında n adet noktadan gene $(n-1)$ dereceli bir polinomu çizebileceğiniz matematiksel bir gerçektir.
- 231 **temel memnuniyet düzeyi**: Lucas ve diğerleri, “Reexamining Adaptation and the Set Point Model of Happiness”.
- 231 **daha karmaşık bir model kullanmanın her zaman daha iyi olmadığıdır**: İstatistikçiler modeldeki çeşitli faktörlere işaretçiler demektedir. Bir eğriye uyum sağlamaya çalışan düz bir çizgi gibi olan aşırı derecede basit bir modelin ön yargılı olduğu söylenir. Bir modelin aşırı derecede karmaşık olduğu ve bu nedenle de verideki küçük değişikliklerden çok fazla etkilendiği sistematik hata içeren tersi durum ise sapma olarak bilinir.

Bu iki tür hatanın birbirlerini tamamlayıcı şekilde olabilmeleri ise şaşırtıcıdır. Modeli daha esnek ve karmaşık kılarak ön yargıları azaltmak sapmayı artırabilir. Ve modeli basitleştirerek ve veri setine daha gevşek bir şekilde uyum sağlayarak ön yargıları azaltmak da bazen sapmayı azaltabilir.

Heisenberg’in quantum fiziğindeki meşhur belirsizlik prensibi gibi (bir parçacığın momentumu hakkında ne kadar fazla şey bilerseniz onun konumu hakkında o kadar az şey bilirsiniz) ön yargı-sapma dengesi denilen şey bir modelin ne kadar iyi olabileceği konusunda derin ve temel bir sınır belirlemektedir: Neyi bilmenin ya da neyi tahmin etmenin mümkün olduğu konusunda. Bu konu için bkz. Ge-

man, Bienenstock ile Doursat, “Neural Networks and the Bias/Variance Dilemma” ve Grenander, “On Empirical Spectral Analysis of Stochastic Processes”.

- 233 **Krallar Kitabı’nda:** Nehushtan olarak bilinen bronz yılan İki Kral, bölüm 18:4’te yok edilir.
- 234 **“dövmeleri çıkarmak için iyi para ödüyoruz”:** Gilbert, “Stumbling on Happiness”.
- 236 **50 yıldan daha yakın bire süre öncesine kadar resmi düellolarda kullanılan:** Eğer mideniz kaldırırsa 1967’de yapılan bir düellonun görüntülerini şu adreste izleyebilirsiniz: http://passerelle-production.u-bourgogne.fr/web/atip_insulte/Video/archive_duel_france.swf.
- 236 **sporcular taktiklerini puan sistemine göre aşırı uydurdukça:** Bilinçli bir şekilde eskrimde fazla uyum sağlama örneği için bkz. Har-
menberg, Epee 2.0.
- 236 **“Teşvik edici ve yönlendirici yapılar işe yaramaktadır”:** Brent Schlender, “The Lost Steve Jobs Tapes”, Fast Company, Mayıs 2012, <http://www.fastcompany.com/1826869/lost-steve-jobs-tapes> .
- 236 **“CEO neyi ölçmek isterse”:** Sam Altman, “Welcome, and Ideas, Products, Teams and Execution Part I,” Stanford CS183B, 2014 Sonbahar dönemi, “How to Start a Startup” <http://startupclass.samaltman.com/courses/lec01/> .
- 236 **Ridgway... katalog hâline getirdi:** Ridgway, “Dysfunctional Consequences of Performance Measurements.”
- 236 **iş bulma konusunda:** Ridgway, Blau’nun “The Dynamics of Bureaucracy” çalışmasına atıfta bulunmaktadır.
- 237 **“Dostlar, dostlarının sayfa görüntülenme oranlarını ölçmesine izin vermez”:** Avinash Kaushik, “You Are What You Measure, So Choose Your KPIs (Incentives) Wisely!” <http://www.kaushik.net/avinash/measure-choose-smarter-kpis-incentives/>
- 238 **“ellerinde bu boş kovanlar olan hayatını kaybetmiş polis memurları bulunmaktadır”:** Grossman ve Christensen, “On Combat”. Bkz. http://www.killology.com/on_combat_ch2.htm.
- 238 **saldırganın silahını elinden kapmış ve daha sonra yine içgüdüsel olarak geri vermişti:** a.g.e.
- 241 **“Eğer bir şeyi basitçe açıklayamıyorsan; onu yeteri kadar iyi anlamamışsın demektir”:** Genellikle Albert Einstein’a atfedilen bu söz muhtemelen ona ait değildir.

- 241 **Tikhonov buna bir cevap önermişti:** Bkz. Tikhonov ve Arsenin, "Solution of Ill-Posed Problems".
- 242 **1996 senesinde biyoistatistikçi Robert Tibshirani tarafından bulunan:** Tibshirani, "Regression Shrinkage and Selection via the Lasso".
- 242 **İnsan beyninin, ...yaklaşık beşte birini yakıyor olması:** İnsan beyninin enerji tüketimi üzerine daha fazla bilgi için bkz. Raichle ve Gusnard, "Appraising the Brain's Energy Budget" ve bu çalışmanın atıfta bulunduğu Clarke ve Sokolo, "Circulation and Energy Metabolism of the Brain".
- 243 **nöronlarının sayısını minimize etmeye çalışmasını:** Sinir ağlarından esinlenen bu stratejiyi kullanarak araştırmacılar, görsel kortekstekine benzer yapay nöronlar geliştirmişlerdir. Bkz. Olshausen ve Field, "Emergence of Simple-Cell Receptive Field Properties".
- 243 **çığır açan "ortalama varyans portföy optimizasyonu" çalışması:** Markowitz'in Nobel Ödülü aldığı çalışması "Portfolio Selection" isimli yazısı ve *Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments* isimli kitabında yer almaktadır.
- 244 **"yatırımımı hisse senedi ve bonolar arasında yarı yarıya böldüm":** Harry Markowitz, Jason Zweig'in "How the Big Brains Invest at TIAA-CREF", Money 27(1): 114, Ocak 1998 eserindeki alıntıdan.
- 245 **"daha az bilgi, hesaplama ve zamanının":** Gigerenzer ve Brighton, "Homo Heuristicus".
- 245 **1990'ların ortasından 2013'e kadar olan süreçte dört kattan daha fazla büyümüştür:** Kuzey Amerika Soyalı Besinler Birliğinden alınmıştır, "Sales and Trends," <http://www.soyfoods.org/soy-products/sales-and-trends> , burada da "Katahdin Ventures" tarafından yapılan araştırmaya atıfta bulunmaktadır.
- 245 **"Şimdilerde fındık ve badem moda":** Vanessa Wong, "Drinkable Almonds", Bloomberg Businessweek, 21 Ağustos 2013.
- 246 **2004'ten bu yana bakılacak olursa muhteşem bir şekilde üç katına:** Lisa Roolant, "Why Coconut Water Is Now a \$1 Billion Industry", TransferWise, <https://transferwise.com/blog/2014-05/why-coconut-water-is-now-a-1-billion-industry/>.
- 246 **"tanınmamışlıktan vazgeçilmezliğe doğru sıçrama yapmış":** David Segal, "For Coconut Waters, a Street Fight for Shelf Space", New York Times, 26 Temmuz 2014.

- 246 **kara lahana pazarı sadece 2013 senesinde yüzde 40 büyüdü:** “Sales of Kale Soar as Celebrity Chefs Highlight Health Benefits,” The Telegraph, 25 Mart 2013
- 246 **salata barlarına dekoratif olarak bunları koyan Pizza Hut idi:** Ayla Withee, “Kale: One Easy Way to Add More Superfoods to Your Diet,” Boston Magazine, 31 Mayıs 2012.
- 247 **ilk omurgalıların vücutlarının 180 derece dönebildiği bir noktaya kadar geri gitmektedir:** Kinsbourne, “Somatic Twist”. İlk omurgalıların vücut ve organlarına ilişkin daha fazla bilgi için Lowe ve diğerleri, “Dorsoventral Patterning in Hemichordates”. Daha yaklaşımsal bir inceleme için Kelly Zalocusky, “Ask a Neuroscientist: Why Does the Nervous System Decussate?”, Stanford Neuroblog, 12 Aralık 2013, <https://neuroscience.stanford.edu/news/ask-neuroscientist-why-does-nervous-system-decussate>.
- 247 **çene kemiklerinin aslında memelilerde yeniden şekillendirildiği:** Bkz. “Jaws to Ears in the Ancestors of Mammals”, Understanding Evolution, http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/evograms_05
- 251 **“Eğer neyin önemli olduğunu ölçemediğimiz bir yerden başlasak”:** “The Scary World of Mr Mintzberg”, Simon Caulkin ile röportaj, Guardian, 25 Ocak 2003, <http://www.theguardian.com/business/2003/jan/26/theobserver.observerbusiness11>.
- 251 **“bir kişinin tüm hayatını işçi arı gibi”:** Darwin, The Correspondence of Charles Darwin, Cilt 2: 1837–1843.
- 252 **“Ne zaman? Hemen mi yoksa biraz daha geç mi?”:** a.g.e.

8. Rahatlama

- 253 **“peptid bir inhibitörünü başarılı bir şekilde tasarlayabilir”:** Meghan Peterson (née Bellows), kişisel görüşmeden, 23 Eylül 2014.
- 254 **11¹⁰⁷ muhtemel oturma düzeni:** Tam olarak ifade etmek gerekirse eğer her bir kişi için ayrı ayrı masa planlaması seçiyorsak o zaman 11¹⁰⁷ olasılık olurdu. Bu sayı her masada sadece 10 kişinin oturabileceği kısıtı göz önüne alındığında biraz daha az olmaktadır. Ama yine de çok büyüktür. Bellows bilgisayarın verdiği sonuçlardan memnundu: Meghan Bellows’un oturma planını çözmek için kullandığı yapı şurada anlatılmaktadır: Bellows ve Peterson, “Finding an Optimal Seating Chart”.

- 255 **Lincoln... “kırsal bölge avukatı” olarak çalıştı:** Lincoln ile ilgili bu konuda daha fazlasını okumak için bkz. Fraker, “The Real Lincoln Highway”.
- 256 **“postacı probleminden”:** Menger’in “Das botenproblem” isimli çalışması Menger tarafından 5 Şubat 1930’da Viyana’da bu konu hakkında verilen bir dersi içerir. Seyyar Satıcı Probleminin geçmişi hakkında daha geniş bilgi için bkz. Schrijver, “On the History of Combinatorial Optimization” ve Cook’un okuması oldukça keyifli kitabı *In Pursuit of the Traveling Salesman*.
- 256 **meslektaş Merrill Flood:** Flood, “The Traveling-Salesman Problem”.
- 256 **problemin ikonik ismi 1949’da ilk defa:** Robinson, “On the Hamiltonian Game”.
- 257 **“olasılıksızlık sonucuna ulaşabilir”:** Flood, “The Traveling-Salesman Problem.”
- 257 **“Seyyar satıcı problemi için iyi bir algoritmanın olmadığını düşünüyorum.”:** Edmonds, “Optimum Branchings.”
- 257 **çözümünü neyin mümkün (feasible) kılıp:** Cobham, “The Intrinsic Computational Difficulty of Functions” çalışması açık bir şekilde neyin “mümkün” bir algoritma olarak değerlendirilmesi gerektiği sorusunu ele almaktadır. Benzer şekilde Edmonds’un da “Paths, Trees, and Flowers” çalışması zor bir problem için olan çözümün neden önemli olduğunu açıklamakta ve algoritmaları nelerin iyi kıldığını hakkında genel bir yapı ortaya koymaktadır.
- 258 **alanın sınırları aşan konusu olmuştur:** Aslında polinom zamandan daha yavaş ancak üssel zamandan daha hızlı sürede çalışan algoritmalar vardır; bu “süper-polinom” çalışma süreleri bu algoritmaları da verimli algoritmalar setinin dışında bırakmaktadır.
- 258 **verimli bir şekilde çözülebilir olup olmadığının:** Bilgisayar biliminde verimli bir şekilde çözülebilen problemler seti “polinom zaman” ifadesinin kısaltması olarak kullanılan P ile adlandırılır. Buna karşın liminal problemler seti ise NP olarak adlandırılır (NP: nondeterministic polynomial). NP sınıfındaki problemler çözümlerini bulunduğu doğrularlar fakat kolay bir şekilde çözümü doğrulanan her problemin kolay bir şekilde çözülüp çözülemediği bilinmemektedir. Örneğin eğer biri size bir yol gösterip bunun 1.000 kilometreden kısa olduğunu söylerse bunu kontrol etmek kolaydır. Ama 1.000 kilometreden

daha kısa bir yol bulmak ya da bunun imkânsız olduğunu kanıtlamak tamamen başka bir şeydir. P'nin NP'ye eşit olup olmadığı (örneğin NP zorluktaki problemlerin çözümlerine verimli bir şekilde atlamının mümkün olup olmadığı) sorusu bilgisayar biliminde çözülmemiş en büyük gizemdir.

Bir çözüme doğru ana ilerleme yöntemi özel statüsü olan belirli problemler olduğunun gösterilmesi olmuştur. Eğer bunlardan biri verimli bir şekilde çözülebilirse o zaman NP zorluktaki herhangi bir problem de verimli bir sürede çözülebilir ve $P=NP$ olur (Cook, "The Complexity of Theorem-Proving Procedures"). Bunlar "NP-Zor" problemler olarak bilinirler. $P=NP$ sorusuna bir cevabın olmadığı bu durumda NP sınıfına ait problemler verimli bir zamanda çözülemezler ve biz de bu nedenle onlara "çözumsuz" demektediriz. (Donald Knuth "A Terminological Proposal" isimli çalışmasında bunun NP zor problemler için uygun bir etiket olduğunu belirtmiş ve buna ilaveten $P=NP$ olduğunu her kim ispatlarsa ona canlı bir hindi vermeyi önermiştir. Eugene Lawler'ın karşılaşmış olduğu ve 5'inci bölümde gördüğümüz çözumsuz çizelgeleme problemleri bu kategoriye girmektedir. Kendisi NP olan NP-Zor bir problem "Tam NP" olarak bilinir. Gezgini satıcı probleminin NP Tam bir problem olduğunu görmek için bkz. Karp, "Reducibility Among Combinatorial Problems" ve Fortnow, The Golden Ticket: P, NP ile P ve NP tanıtımı için "Search for the Impossible".

258 **birçok bilgisayar mühendisi:** 2002 senesinde önde gelen 100 teorik bilgisayar mühendisi arasında yapılan bir ankette bunlardan 61'i $P \neq NP$ olduğunu ve sadece dokuzu $P = NP$ olduğuna inanmaktaydı (Gasarch, "The $P = ? NP$ Poll"). $P=NP$ olduğunu ispatlamak NP Tam bir problem için polinom zamanlı bir algoritmayla yapılabilmesine karşın $P \neq NP$ olduğunu ispatlamak polinom zamanlı algoritmaların sınırları hakkında karmaşık argümanlar sunmayı gerektirir ve ankete katılan kişiler arasında bu problemi çözmek için ne tarz bir matematik kullanılması gerektiği konusunda bir fikir birliği yoktu. Fakat ankete katılanların yarısı kadarı bu konunun 2060'tan önce çözüleceğini düşünüyordu.

258 **Dahası, diğer birçok optimizasyon problemi:** Bu sınıfa Karp'ın "Reducibility Among Combinatorial Problems" çalışmasında NP sınıfına ait olduklarını anlattığı vertex ve set kapsama türündeki versi-

yonlar da girmektedir ve bu çalışmada kümelerde olan 21 problem gösterilmiştir. 1970'lerin sonuyla birlikte bilgisayar mühendisi 300 kadar NP tam problem tanımladılar (Garey ve Johnson, "Computers and Intractability") ve bu liste o zamandan bu yana oldukça dikkat çekici şekilde büyümüştür. Bunların arasında insanların oldukça yakından tanıdığı problemler de bulunmaktadır. 2003 senesinde Sudoku'nun NP tam olduğu gösterilmiştir (Yato ve Seta, "Complexity and Completeness"), bununla birlikte Tetris oyununda ortadan kaldırılan sıra sayısını maksimize etmenin gelecek olan sıradaki parçalara ilişkin kusursuz bilgiye sahip olursa bile NP tam olduğu da gösterilmiştir (Demaine, Hohenberger ile Liben- Nowell, "Tetris Is Hard, Even to Approximate"). 2012 senesinde Super Mario gibi oyunlarda bölüm sonuna giden bir yolun varlığının ispatı da listeye resmen eklenmiştir (Aloupis, Demaine ile Guo, "Classic Nintendo Games are (NP-) Hard").

- 259 **"mücadele etmek zorundasınız"**: Jan Karel Lenstra, kişisel görüşmelerden, 2 Eylül 2014.
- 259 **"Mükemmel, en iyinin düşmanıdır"**: Voltaire'in sözü; "La Bégueule" şiirinin başında yer almaktadır. Voltaire daha önceleri İtalyanca "Le meglio è l'inimico del bene" ifadesine 1764'te Dictionnaire philosophique eserinde yer vermiştir.
- 259 **akılları hemen rahatlamaya gider**: Shaw, "An Introduction to Relaxation Methods"; Henderson, "Discrete Relaxation Techniques".
- 260 **Lincoln'ün 1855'teki adli seyahati**: Lincoln'ün turunda uğradığı kasabalar, Abraham Lincoln Kuruluşu 1847-1853 8'inci Yargı Bölgesi Raporu'ndan alınmıştır. Bkz. http://quod.lib.umich.edu/j/jala/images/fraker_g01a.jpg.
- 260 **neredeyse hiç zamanını almaz**: Peki tamam, biraz zamanını alır. Eğer şanslıysanız şehirlerin sayısı ile lineer olarak, değilseniz yarı doğrusal olarak. Pettie ve Ramachandran, "An Optimal Minimum Spanning Tree Algorithm".
- 260 **en kısa örten ağaç geri gidebilmeye izin vermeme özelliğiyle**: Seyyar satıcı problemine en kısa örten ağaç yaklaşımıyla yaklaşmak Christo des'in "Worst-Case Analysis of a New Heuristic" çalışmasında anlatılmıştır.
- 261 **Dünya üzerindeki tüm şehirlere uğrayan**: Bu problemin en güncel durumunun bir raporu <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/world/adre/>

sinde bulunabilir. Genel olarak seyyar satıcı problemi hakkında daha fazla bilgi için Cook'un "In Pursuit of the Traveling Salesman" çalışması iyi bir genel başvuru kaynağıdır ve Lawler ve diğerlerinin "The Traveling Salesman Problem" çalışması daha derine inmek isteyenleri tatmin edecektir.

- 262 **itfaiye istasyonlarını yerleştirmeye çalışırlar:** Bu klasik ayrık optimizasyon problemi küme kapsama problemi olarak bilinir.
- 263 **"bunun yarısını ve şunun yarısını yapamazsınız":** Laura Albert McLay, kişisel görüşmelerden, 16 Eylül 2014.
- 263 **en az sayıda davetiye göndermenize:** Bilgisayar biliminde bu, vertex kapsama problemi olarak bilinir. Küme kapsama probleminin kuzeni gibidir. Burada herkesi kapsama alanına alan itfaiye istasyonlarının minimum sayısını aramak yerine amaç, diğer herkesle bağlantılı olan minimum kişi sayısını bulmaktır.
- 263 **sürekli versiyonları için:** Polinom zaman içinde çözülebilen sürekli optimizasyon problem türleri mevcuttur. En ünlü örneği hem optimize edilecek ölçütlerin hem de çözüm üzerindeki kısıtların değişkenlerinin doğrusal bir fonksiyon olarak ifade edilebildiği doğrusal programlama problemleridir. Bkz. Khachiyan, "Polynomial Algorithms in Linear Programming" ve Karmarkar, "A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming". Fakat sürekli optimizasyon her yerde deva bir çözüm değildir. Aynı zamanda çözümsüz olan sürekli optimizasyon problemleri de vardır. Örnekler için bkz. Pardalos ve Schnitger, "Checking Local Optimality in Constrained Quadratic Programming is NP-hard".
- 264 **en fazla iki katı:** Khot ve Regev, "Vertex Cover Might Be Hard to Approximate to Within $2-\epsilon$ ".
- 264 **süatle optimal çözümün yakınlarına:** Bu konuda daha fazlası için bkz. Vazirani, Approximation Algorithms"
- 264 **sihirli bir değnek değildir:** Sürekli Gevşetmenin minimum vertex kapsama (parti davetiyesi) problemi için mümkün olan en iyi yakınsamayı mı sunduğu yoksa daha iyi yakınsamaların bulunup bulunamayacağı hâlen bu alanda tartışmalı olan bir sorudur.
- 265 **"Anlaşılmaz!":** The Princess Bride, William Goldman; 20th Century Fox yapım şirketi, 1987.
- 265 **Lagrange Gevşetmesi denilen güçlü bir hesaplama tekniği:** Bu isim UCLA'den Arthur M. Geoffrion tarafından "Lagrangean Relaxa-

tion for Integer Programming” isimli çalışmada verilmiştir. Fikrin kendisinin Michael Held (IBM) ile Richard Karp (UC Berkeley)’ın 1970 senesinde seyyar satıcı problemi üzerine yaptıkları çalışmadan çıktığına inanılır. Bkz. Held ve Karp, “The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees”; Held ve Karp, “The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees: Part II”. Fakat daha öncesi de mevcuttur. Örneğin, Lorie ve Savage, “Three Problems in Rationing Capital”; Everett III, “Generalized Lagrange Multiplier Method”; Gilmore ve Gomory, “A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem, Part II”. Genel bir bakış açısı ve uygulamalar için bkz. Fisher, “The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems”; ayrıca Geoffrion, “Lagrangian Relaxation for Integer Programming”.

266 **“küsurlü maçlar”**: Michael Trick, kişisel görüşmelerden, 26 Kasım 2013.

269 **“yap ve inan olayı hiçbir zaman”**: Christopher Booker, “What Happens When the Great Fantasies, Like Wind Power or European Union, Collide with Reality?”, the Telegraph, 9 Nisan 2011.

9. Rastlantısallık (Randomness)

271 **“neden ve nasıl olduğu tamamen gizemlidir”**: Shasha ve Rabin’in “An Interview with Michael Rabin” çalışmasından alınmıştır.

271 **rastlantısal algoritma**: Rastlantısal algoritmalar, Motwani ve Raghavan’ın “Randomized Algorithms ve Mitzenmacher” ile Upfal’ın “Probability and Computing” çalışmalarında detaylı olarak anlatılmıştır.

272 **ilgi çekici bir olasılık analizinin**: Buffon, “Essai d’arithmétique morale”.

272 **sadece bir kâğıt üzerine iğneler bırakarak**: Laplace, Théorie analytique des probabilités.

273 **Mario Lazzarini**: Lazzarini, “Un’applicazione del calcolo della probabilità.”

273 **Lazzarini’nin raporuna şüpheyile yaklaşılmasına**: Lazzarini’nin sonuçları hakkında daha fazlası için bkz. Gridgeman, “Geometric Probability and the Number π ” ve Badger, “Lazzarini’s Lucky Approximation of π ”.

- 273 **Ensefalit hastalığına yakalanmıştı:** Ulam'ın hayat hikâyesi için bkz. Ulam, "Adventures of a Mathematician".
- 274 **"Birinci sınıf bir zekânın testi":** Fitzgerald, "The Crack-Up". Daha sonra diğer kaynaklarla birlikte The Crack-Up'ta derlenmiştir.
- 274 **"Çok daha pratik olabileceğini fark ettim...":** Ulam, "Adventures of a Mathematician", sf. 196–197. Klondike Soliter oyunu için kazanma olasılıklarını hesaplamak bugün bile devam etmektedir ve başta Monte Carlo simülasyonu uygulanarak hâlen aktif bir araştırma alanı olarak varlığını sürdürmektedir. Bu alanda son zamanlarda yapılan çalışmalar için bkz. Bjarnason, Fern ve Tadeapalli, "Lower Bounding Klondike Solitaire with Monte-Carlo Planning".
- 275 **Metropolis bu yaklaşımı,... adlandırdı:** Metropolis isim verme sürecini anlatırken Hurd'un "Note on Early Monte Carlo Computations" çalışmasından bahsetmektedir.
- 276 **hahamlık yolundan:** Shasha ve Lazere, "Out of Their Minds".
- 276 **takip edebileceği birden fazla yol:** Rabin'in Dana Scott ile birlikte kaleme aldığı bu önemli çalışması "Finite Automata and Their Decision Problems" idi. Bu konseptin teorik bilgisayar biliminin nasıl merkezi bir konuma geldiğini kitabın 8'inci bölümünde seyyar satıcı probleminin karmaşıklık sınıfından bahsederken daha önce görmüştük; Rabin'in "deterministik olmayan" hesaplama nosyonu NP'nin N'idir.
- 277 **"açık bir şekilde en faydasız alanlarından biri":** Hardy, "Prime Numbers"; ayrıca bkz. Hardy, "Collected Works". Asal sayıların kriptografi üzerindeki etkisi hakkında daha fazlası için bkz. Schneier, "Applied Cryptography".
- 277 **Örneğin, modern şifrelemede:** Asal sayıların çarpımına dayalı algoritmalar yaygın olarak kullanılanlarından biri RSA'dır. Buradaki harfler, algoritmayı bulan kişilerin soy adlarından gelmektedir: Ron Rivest, Adi Shamir ve Leonard Adleman. Bkz. Rivest, Shamir ile Adleman, "A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems". Diğer kriptografi sistemleri de -örneğin Diffie-Hellman- asal sayıları kullanırlar. Bkz. Diffie ve Hellman, "New Directions in Cryptography".
- 278 **buradaki sorun hatalı çıkan pozitif sonuçlardır:** Miller'ın yaklaşımındaki çığır açıcı şey -ya da eksiklik- bu hatalı olumlu sonuçların ne kadar kolay göz ardı edilebileceği olacaktı. n sayıdaki bir şeyden

emin olmak için kaç tane x değerine ihtiyacınız vardır? Miller eğer “genelleştirilmiş Riemann hipotezi” gerçek ise kontrol edilmesi gereken minimum muhtemel gözlemin sayısının $O(\log n)^2$ olduğunu, yani Erasthenes süzgeci gibi algoritmalar için gereken n sayısından çok daha az olduğunu gösterdi. Fakat sıkıntı genelleştirilmiş Riemann hipotezinin ispat edilmemiş ve hâlen edilmemiş olmasıydı.

(İlk olarak Alman matematikçi Bernhard Riemann tarafından 1859’da sunulmuş olan Riemann hipotezi Riemann zeta fonksiyonu isimli karmaşık bir matematik fonksiyonu hakkındadır. Bu fonksiyon asal sayıların dağılımıyla ve özellikle bu sayıların bulundukları sıralarda ne kadar düzenli olarak yer aldıklarıyla yakından ilişkilidir. Eğer hipotez doğru ise asal sayılar Miller’in algoritmasının verimliliğini garanti edecek şekilde uygun davranış sergilemektedir. Fakat kimse bunun doğru olup olmadığını bilmiyor. Aslında Riemann hipotezi, Clay Matematik Enstitüsü’nün çözümü için bir milyon dolarlık “Milenyum Ödülü” vereceği altı ana matematik probleminden biridir. 8’inci bölümde görmüş olduğumuz $P=NP$ olup olmadığı sorusu da yine Milenyum Ödülü sorularındandır).

279 “*Michael, benim Vaughan*”: Rabin bu hikâyeyi Shasha ve Lazere’nin “Out of their Minds” çalışmasında anlatmaktadır.

279 **çok büyük bile olsa asal sayıları çok hızlı bir şekilde tanımlamak:** Rabin’in asallık testi üzerine olan yazısı “Probabilistic Algorithm for Testing Primality” birkaç sene sonra yayınlandı. Benzer şekilde Robert Solovay ile Volker Strassen asal sayıların uymak zorunda olduğu farklı bir eşitlik setine dayalı benzer bir algoritma geliştirdiler fakat algoritmaları diğerine nazaran daha az verimliydi. Bkz. Solovay ve Strassen, “A Fast Monte-Carlo Test for Primality”.

280 **bir milyon x milyar x milyarda bir olasılığında:** OpenSSL için olan dokümantasyon “en fazla 2’ye 80 rastgele girdi durumunda hatalı pozitif sonuç veren bir Miller-Rabin olasılıklı asallık testi icra etmek için fonksiyon belirler. Bkz. https://www.openssl.org/docs/crypto/BN_generate_prime.html . Benzer şekilde ABD Federal Bilgi İşlem Standartları (FIPS) Dijital İmza Standartlarının (DSS) 2’ye 80 hata olasılığını kabul edecek şekilde (en azından 1024 bit anahtarlar) belirler. Bkz. Gallagher ile Kerry, “Digital Signature Standard”. 40 Miller-Rabin testi bu sınırı yakalamak için yeterlidir ve 1990’lardan bu yana yapılan çalışmalar birçok durumda üç kadar az sayıda Miller-Rabin

testi de yeterli olabilir. Bkz. Damgård, Landrock ile Pomerance, “Average Case Error Estimates for the Strong Probable Prime Test”; Burthe Jr., “Further Investigations with the Strong Probable Prime Test”; ve Menezes, Van Oorschot ile Vanstone, “Handbook of Applied Cryptography”. Ayrıca konu hakkındaki son zamanlardaki tartışmalar için bkz. <http://security.stackexchange.com/questions/4544/how-many-iterations-of-rabin-miller-should-be-used-to-generate-cryptographic-saf>.

- 280 **Dünyadaki kum tanelerinden:** Bu sayının farklı kaynaklarda yer alan tahmini 10^{18} ila 10^{24} arasındadır.
- 280 **etkili bir algoritmanın olup olmayacağı:** Burada etkili ifadesiyle 8’inci bölümde bahsedilen alandaki standart tanım olan polinom zaman kast edilmektedir.
- 280 **böyle bir metot:** Agrawal, Kayal ile Saxena, “PRIMES is in P”.
- 280 **Sadece rastgele x ’ler üretin:** Rastlantısallığın polinom kimlik testindeki rolünün önemli sonuçlarından biri “Schwartz-Zippel Açmazı” denilen şeydir. Bkz. Schwartz, “Fast Probabilistic Algorithms for Verification of Polynomial Identities”; Zippel, “Probabilistic Algorithms for Sparse Polynomials”; DeMillo ve Lipton, “A Probabilistic Remark on Algebraic Program Testing”.
- 281 **elimizdeki tek pratik metottur:** Polinom kimlik testi için verimli bir deterministik algoritma hiç bulunabilecek mi? Daha da açıkçası, rastgele bulduğumuz verimli bir deterministik algoritma olmak zorunda mıdır? Ya da rastlantısal algoritmaların verimli şekilde çözebildiği ama deterministik algoritmaların çözemediği problemler olabilir mi? Bu soru bilgisayar biliminin ilginç sorularından biridir ve cevabı hâlen bilinmemektedir.

Rastlantısal algoritmalar ile deterministik algoritmalar arasındaki ilişkiyi araştırmak için kullanılan yaklaşımlardan biri rastlantısallığı kaldırmaktır (yani aslında temel olarak rastlantısal algoritmaları almak ve onlardan rastlantısallık özelliğini ayırmak). Uygulamada bir bilgisayarın gerçek rastlantısallığa ulaşması zordur, bu nedenle ne zaman insanlar rastlantısal bir algoritma kullansa genellikle gerçek rastlantısallığın belirli istatistiksel kurallarına uyan sayılar yaratmak için deterministik bir prosedür izlemiş olurlar. Rastlantısallığı kaldırma işleminde rastlantısal algoritmalarındaki rastgelelik diğer bazı kar-

maşık hesaplama işlem süreçlerinin çıktılarıyla değiştirildiğinde incelenir.

Rastlantısallığın kaldırılması konusundaki çalışmalar, verimli bir rastlantısal algoritmayı verimli bir deterministik algoritmaya dönüştürmenin mümkün olduğunu göstermektedir (çıktısı rastlantısal gözükse ancak yeteri kadar basit bir şekilde hesaplanabilecek olan bir fonksiyon bulabilmeniz koşuluyla). Detaylı bilgiler için bkz. Impagliazzo ve Wigderson, “P = BPP if E Requires Exponential Circuits”; Impagliazzo ve Wigderson, “Randomness vs. Time”.

- 281 **“cehalet örtüsü” dediği:** Bu ifade ilk olarak Rawls’ın “A Theory of Justice” çalışmasında kullanılmıştır.
- 282 **Rawls’ı felsefi bakımdan eleştirenler:** Bunların en ünlüsü ekonomist John Harsanyi idi. Bkz. Harsanyi, “Can the Maximin Principle Serve as a Basis for Morality? A Critique of John Rawls’s Theory”.
- 282 **Omelas medeniyetinde olduğu gibi:** Le Guin, “The Ones Who Walk Away from Omelas.”
- 283 **Bunlar yerinde eleştirilerdir:** Daha fazlası için bkz. Parfit, “Reasons ve Persons”; Arrhenius, “An Impossibility Theorem in Population Axiology”.
- 283 **“filozoflardan ziyade mühendislerin derdi”:** Aaronson, “Why Philosophers Should Care About Computational Complexity”.
- 285 **“genelde görmediğiniz bir şey fark edebilirsiniz”:** Rebecca Lange, “Why So Few Stories?,” GiveDirectly blogu, 12 Kasım 2014, <https://www.givedirectly.org/blog-post.html?id=2288694352161893466>.
- 286 **“kastetmek istediğim Negatif Yetenektir”:** John Keats, George ve Thomas Keats’e yazılan mektuptan, 21 Aralık 1817.
- 286 **“insanların hayatlarındaki amaçları için yeterli bir garanti”:** John Stuart Mill, On Liberty (1859).
- 286 **“içki içilmesi zorunlu olan bir oyun”:** Michael Mitzenmacher, Kişisel görüşmelerden, 22 Kasım 2013.
- 287 **bir trilyondan fazla sayıda URL’den:** “We Knew the Web Was Big...” 25 Temmuz 2008, <http://googleblog.blogspot.com/2008/07/we-knew-web-was-big.html>.
- 287 **77 karakter uzunluğundadır:** Kelvin Tan, “Average Length of a URL (Part 2),” 16 Ağustos 2010, <http://www.supermind.org/blog/740/average-length-of-a-url-part-2>.

- 287 **URL aslında... bir dizi eşitliğe sokulur:** Bloom, “Space/Time Trade-
o s in Hash Coding with Allowable Errors”.
- 287 **yeni tarayıcılarla birlikte sunulmuştur:** Google Chrome en azından
2012’ye kadar bir Bloom filtresi kullandı. Bkz. <http://blog.alexeykunin.com/2010/03/nice-bloom-filter-application.html> ve <https://chromiumcodereview.appspot.com/10896048/>.
- 287 **Bitcoin gibi kriptoparaların da:** Gavin Andresen, “Core Develop-
ment Status Report #1,” 1 Kasım 2012, <https://bitcoinfoundation.org/2012/11/core-development-status-report-1/>.
- 288 **“Nehir hep dolambaçlı yoldan akıyordu çünkü düşünemiyordu”:**
Richard Kenney, “Hydrology; Lachrymation”, *The One-Strand River: Poems* eserinden, 1994–2007 (New York: Knopf, 2008).
- 291 **bu stratejiyi şifreleri çözmeye çalışırlarken kullanırlar:** Bkz. Berg-
Kirkpatrick ve Klein, “Decipherment with a Million Random Res-
tarts”.
- 292 **bu tekniğin adı Metropolis Algoritması’dır:** Bazen Metropolis-
Hastings algoritması olarak da bilinen bu teknik Metropolis ve diğer-
lerinin “Equation of State Calculations by Fast Computing Machi-
nes,” ve Hastings’in “Monte Carlo Methods Using Markov Chains
and Their Applications” çalışmalarında anlatılmıştır. Metropolis Al-
goritması Nicholas Metropolis ve iki karı-koca ekibi olan Marshall ile
Arianna Rosenbluth ve Edward ile Augusta Teller tarafından
1950’lerde geliştirilmiştir. Metropolis algoritmayı anlatan ilk yazının
sahibidir, bu nedenle bugün Metropolis Algoritması olarak bilinmek-
tedir ki bu da şüphesiz ironiktir. İlk olarak Metropolis algoritmanın
geliştirilmesine çok az katkıda bulunmuştur (Bkz. Rosenbluth, *Mars-
hall Rosenbluth, Interviewed by Kai- Henrik Barth*). Dahası Metropo-
lis’in kendisi bazı kimyasallara, MANIAC bilgisayarına ve Monte
Carlo tekniğine değişik isimler verdiğini kabul etmektedir. (Hurd,
“Note on Early Monte Carlo Computations”).
- 293 **“Bir eritme işleminden bir kristal büyütmek”:** Kirkpatrick, Gelatt
ile Vecchi, “Optimization by Simulated Annealing”.
- 294 **“IBM’de... en iyi kişi”:** Scott Kirkpatrick, kişisel görüşmelerden, 2
Eylül 2014.
- 295 **En sonunda çoğunlukla tepe tırmanıyor:** Bu fikir (seçenekler ara-
sında gezinerek başlama ve daha sonra iyi olanlara daha sıkı odaklan-
ma) tanıdık geliyor mu? Çünkü gelmeli: Karmaşık bir fonksiyonu

optimize etmek araştır/kullan dengesiyle yüzleşmeyi gerektirir. Ve rastlantısallık da Kirkpatrick'in üzerinde çalıştığı problemlerle birlikte çok kollu canavar problemi gibi problemleri çözmek için oldukça iyi stratejilerin kaynağı olmuştur.

Hatırlarsanız, çok kollu canavar problemi bizlere çeşitli farklı seçenekler -çekebileceğimiz kollar- sunar ve bunlar bize farklı, bilinmeyen getiriler sağlar. Burada zor olan, yeni seçenekleri denemekle (araştırmakla) o ana kadar ki en iyi seçeneğı kovalamak (kullanmak) arasında dengeyi bulmaktır. En iyisi daha iyimser olmak ve biraz daha fazla araştırmacı olmak ve daha sonra kullanmaktır. Alternatifler hakkında böylesi giderek azalan bir iyimserlik stratejisi izlemek umabileceğiniz en iyi sonucu vadeder: Azalan bir ölçekte pişmanlıkları toplamak ve toplam pişmanlığınız zamanın logaritmik bir fonksiyonu olarak artarken.

Rastlantısallık iyimserliğe alternatif bir strateji sağlar. Eğer problem araştırma ve kullanma dengelemesine dair olanlardan biriye neden sadece bunu yapmıyoruz? Zamanınızın birazını araştırarak birazını da kullanarak değerlendirin. Ve işte çok kollu canavar uzmanlarının Epsilon Greedy olarak adlandırdığı algoritma tam olarak budur. Bu algoritmanın iki kısmı vardır: Epsilon ve Greedy. Epsilon kısmı zamanın küçük bir kısmıdır ve seçenekleriniz arasından rastgele seçimler yaparsınız. Greedy kısmı ise o ana kadar bulduğunuz en iyi sonucu aldığınız geniş zaman kesimidir. O nedenle bir restorana girin ve yeni bir şey deneyip denememek istemediğimize karar vermek için bir zar ya da yazı-tura atın. Eğer sonuç evet ise gözlerinizi kapatın ve menünün üzerinde parmağınızı herhangi bir noktaya koyun. Eğer hayır çıkarsa o anki en sevdiğiniz yemeğı sipariş edin.

Ne yazık ki çok canavar üzerine çalışan araştırmacılar Epsilon Greedy algoritmasını sevmemektedirler. Zaman israfı gibi görünmektedir: En iyi sonuç çok çabuk bir şekilde karşınıza çıksa da zamanınızın bir kısmını yeni şeyler aramaya harcamayı baştan garantilersiniz. Eğer Epsilon Greedy algoritmasını takip edecek olursanız oyunu oynadığınız her seferinde pişmanlığınız doğrusal bir şekilde artacaktır. Her yemek yediğinizde en iyinin dışında bir şey seçme şansınız vardır, bu nedenle ortalama pişmanlığınız her seferinde aynı oranda artar. Bu doğrusal büyüme, uygun bir şekilde ayarlanmış optimizasyona

dayanan deterministik algoritmalarındaki logaritmik pişmanlık düzeyinden çok daha kötüdür.

Ancak Epsilon Greedy'nin basitliği size çekici geldiyse daha iyi haberlerimiz var. Bu algoritmanın basit bir değişik versiyonu da vardır: Epsilon-Over-N Greedy olarak adlandırdığımız ve logaritmik pişmanlığı garanti eden ve uygulamada başarılı sonuçlar veren algoritma (Bkz. Auer, Cesa-Bianchi ve Fischer, "Finite-Time Analysis of the Multiarmed Bandit Problem"). Buradaki püf nokta zaman ilerledikçe yeni bir şey deneme şansının giderek azalmasıdır. İlk olarak bir şey seçtiğinizde bunu $1/1$ olasılıkla yeni bir şey deneyerek yaparsınız. Eğer sonuç iyi bir şey çıkarsa, ikinci sefer $1/2$ olasılıkla rastgele seçim yaparsınız. Üçüncü seferde en iyiyi $2/3$ ihtimalle, yeni bir şeyi ise $1/3$ ihtimalle alırsınız. Restorana n 'inci defa gittiğinizde $1/n$ olasılıkla yeni bir şey dener, diğer taraftan kalan olasılıkla da o ana kadar denemiş olduğunuz en iyi seçeneği tercih edersiniz. Yeni bir şey deneme olasılığınızın giderek azalması ile araştırma ve kullanma arasındaki tatlı dengeyi bulursunuz.

Rastlantısallıktan benzer şekilde faydalanan ve çok kollu canavar problemini çözmek için yapılmış daha karmaşık bir algoritma daha vardır. İsmi 1933 senesinde iki tedavi arasında nasıl seçim yapılacağına dair problemi ortaya süren Yale'den fizikçi William R. Thompson'dan alan Thompson Örneklemesi (Thompson, "On the Likelihood at One Unknown Probability Exceeds Another") algoritmasıdır. Thompson'ın çözümü oldukça basitti. Bayes Kuralını kullanarak her tedavinin en iyi olma ihtimalini hesaplayın. İlk olarak hiçbir şey bilmeden başlarsınız ve herhangi birini seçme şansınız eşittir. Veri biriktikçe, birini diğerine tercih etmeye başlarsınız fakat bazen tercih edilmeyen seçeneği seçersiniz ve fikrinizi değiştirme şansına da sahipsiniz. Birinin daha iyi olduğundan daha da emin oldukça en sonunda hep en iyi olan alternatifi seçmeye başlarsınız. Thompson Örnekleme algoritması araştırma ve kullanmayı şık bir şekilde dengeler ve aynı zamanda pişmanlığın sadece logaritmik olarak artmasını sağlar (Bkz. Agrawal ve Goyal, "Analysis of Thompson Sampling").

Bu algoritmanın çok kollu canavar problemlerini çözme için kullanılan diğer algoritmalara karşı avantajı esnekliğidir. Problemin varsayımları değişse bile (bir seçeneğin diğerinden daha iyi olduğuna dair bir bilgi almanız, seçeneklerin birbirine dayanması, seçeneklerin

zamanla değişmesi gibi), Thompson'ın o ana kadar ki en iyi olduklarına dair bir hissiniz olduğunu yansıtan bir olasılıkla seçeneklerin peşinden gitme stratejisi yine de işe yarar. Bu nedenle bu durumların her birinde yeni bir algoritma üretmektense sadece Bayes'in kuralını uygular ve sonuçları kullanırsınız. Gerçek yaşamda bu Bayes hesaplamaları zor olabilir (sadece iki seçenek olduğunda bile Thompson'ın kendisinin problemi çözmesi karmaşık matematik işlemleri içeren birçok sayfa sürmüştür). Ancak en iyi seçeneği seçmek ve belirlilik dereceniz tarafından belirlenen bir rassallık miktarını seçeneklerinize eklemek sizin için kötü bir seçenek değildir.

- 295 **32.000 defa atıfta bulunulacaktı**: Ünlü yapay zekâ kitabı „Artificial Intelligence: A Modern Approach”, tavlama benzetiminin “kendisinin başlı başına bir alan olduğunu ve hakkında her sene yüzlerce yayın yapıldığını” belirtir (sf. 155).
- 295 **optimizasyon problemlerine en fazla umut vadeden**: 2014 senesinde yazılan ilginç bir yazı deniz analarının yiyecek ararken tavlama benzetimini kullandıklarından bahsetmektedir. Bkz. Reynolds, “Signatures of Active and Passive Optimized Lévy Searching in Jelly fish”.
- 296 **“Bir kumarbaz olmayan ben”**: Luria, A Slot Machine, a Broken Test Tube, sf. 75. Ayrıca Garfield, “Recognizing the Role of Chance.”
- 297 **“serendipity” kelimesini bulmuştur**: Horace Mann’a yazılan mektuptan (28 Ocak 1754).
- 298 **“büyük bir benzerlik”**: James, “Great Men, Great Thoughts and the Environment”.
- 298 **“Kör varyasyon ve seçici muhafaza süreci”**: Campbell, “Blind Variation and Selective Retention.”
- 299 **“Newton, Mozart, Richard Wagner ve diğerlerinin”**: a.g.e.
- 299 **“belirli kalıpların dışına çıkmak”**: Brian Eno, Jools Holland ile olan röportajından, on Later . . . with Jools Holland, Mayıs 2001.
- 300 **“anlaşılmaz ve sürekli bir arzu”**: Alıntılanan anlam: Bell, Portekizce.
- 302 **“daha fazla hareket etmeniz için aptal olmanız gerekir”**: Tim Adams, “Dicing with Life”, Guardian, 26 Ağustos 2000.

10. İletişim Ağı Yönetimi (Networking)

- 303 **“Bağlantı teriminin çok geniş bir yelpazede anlamları bulunmaktadır”**: Cerf ve Kahn, “A Protocol for Packet Network Intercommunication”.
- 303 **“Sadece bağlanın”**: Forster, Howards End.
- 304 **“elde taşınan, portatif, gerçek bir cep telefonu”**: Martin Cooper, “Inventor of Cell Phone: We Knew Someday Everybody Would Have One”, Tas Anjarwalla ile olan görüşmeden, CNN, 9 Temmuz 2010.
- 304 **Mesaj “login” idi**: Leonard Kleinrock bu hikâyeyi 2014 senesinde Charles Severance ile icra edilen bir görüşmede anlatmaktadır ve “Len Kleinrock: The First Two Packets on the Internet” <https://www.youtube.com/watch?v=uY7dUJT7OsU> adresinden ulaşılabilir.
- 304 **kelimenin Yunancadaki kökü**: Bkz. the Online Etymology Dictionary, <http://www.etymonline.com/index.php?term=protocol>.
- 306 **“Bir anda pathyörler ve sonrasında derin bir sessizliğe gömülüyorlar”**: Leonard Kleinrock, “Computing Conversations: Len Kleinrock on the Theory of Packets”, Charles Severance ile röportaj (2013). Bkz. <https://www.youtube.com/watch?v=qsgtrtwydw> ve ayrıca <http://www.computer.org/csdl/mags/co/2013/08/mco2013080-006.html>.
- 306 **“tamamen sapkınlık”**: Jacobson, “A New Way to Look at Networking”.
- 306 **“Böylece ufaklık gitti”**: Kleinrock, “Computing Conversations”.
- 306 **paket değişimi olarak bilinecekti**: “Paket değişimi” terimi, zamanında paket değişimi konusuna önemli katkıda bulunan Ulusal Fizik Laboratuvarı’ndan Donald W. Davies’e aittir.
- 307 **“iki uç nokta arasındaki”**: Stuart Cheshire, kişisel görüşmelerden, 26 Şubat 2015.
- 307 **nükleer saldırıdan sonra da devam edebilecekti**: Baran, “On Distributed Communications”.
- 307 **büyüyen bir ağdaki**: Ağ tarihi ve bu konu özelinde daha fazlası için bkz. Jacobson, “A New Way to Look at Networking.”
- 308 **“Avian Carriers” ile**: Bkz. Waitzman, A Standard for the Transmission of IP Datagrams on Avian Carriers, Waitzman, IP Over Avian Carriers with Quality of Service ve Carpenter ile Hinden, Adaptation of RFC 1149 for IPv6 for descriptions of the avian protocol, ayrıca bkz. <http://www.blug.linux.no/rfc1149>.

- 308 **“Hiçbir aktarım yüzde 100 güvenli değildir”**: Cerf ve Kahn, “A Protocol for Packet Network Intercommunication”.
- 309 **“Bizans generalleri problemi”**: Lamport, Shostak ile Pease, “The Byzantine Generals Problem”.
- 311 **sıranın muhafaza edildiğini**: Burada anlatılan süreç hızla geri iletim olarak da bilinir.
- 311 **trafiğin neredeyse yüzde 10’una**: Jon Brodtkin, “Netflix takes up 9,5% of upstream traffic on the North American Internet: ACK packets make Netflix an upload monster during peak viewing hours,” Ars Technica, 20 Kasım 2014. Brodtkin aynı zamanda Sandvine’nin “Global Internet Phenomena Report” isimli raporuna atıfta bulunmaktadır. Bkz. <https://www.sandvine.com/trends/global-internet-phenomena/>.
- 311 **“Alıcıda mı sorun var?”**: Tyler Treat, “You Cannot Have Exactly-Once Delivery”, Brave New Geek: Introspections of a software engineer, 25 Mart 2015, <http://bravenewgeek.com/you-cannot-have-exactly-once-delivery/>.
- 312 **“uçtan uca yeniden iletimler”**: Vint Cerf, Charles Severance’ın röportajından, “Computing Conversations: Vint Cerf on the History of Packets”, 2012.
- 312 **“yeniden söyleyebilir misin?” deyin**: a.g.e.
- 313 **“Dünyanın çevrilmesi en zor kelimesinin”**: Oliver Conway, “Congo Word ‘Most Untranslatable’”, BBC News, 22 Haziran 2004.
- 313 **“Eğer ilk seferinde başaramazsan”**: Thomas H. Palmer, Teacher’s Manual (1840), The Oxford Dictionary of Proverbs, 2009.
- 314 **üniversitenin yedi kampüsünü**: Abramson, “The ALOHA System.”
- 315 **Ortalama yüzde 18,6’nın biraz üzerinde kullanıldığında**: a.g.e. Aslında bu rakam birinci bölümdeki optimal durma konusundaki % 37’nin yarısı kadardır.
- 316 **“işe yarama umudu olan sadece tek plan”**: Jacobson, “Congestion Avoidance and Control.”
- 318 **HOPE (umut) isimli pilot bir program**: HOPE programı Hawken ve Kleiman’ın “Managing Drug Involved Probationer’s çalışmasında değerlendirilmektedir.
- 318 **“Bir kişinin davranışını değiştirmek için ne kadar çılgınca bir yol diye düşünmüştüm”**: Daha fazla bilgi için bakınız “A New Proba-

tion Program in Hawaii Beats the Statistics,” PBS NewsHour, 2 Şubat 2014.

- 319 **“genişliğindeki bin faktörlük ani düşüşten”**: Jacobson, “Congestion Avoidance and Control”.
- 319 **“daha sonra birdenbire çöktü”**: Jacobson, “Van Jacobson: e Slow-Start Algorithm”, Charles Severance’ın röportajından (2012), <https://www.youtube.com/watch?v=QP4A6L7CEqA>.
- 320 **iletim oranını agresif bir şekilde artıracaktır**: Bu ilk süreç TCP’de Yavaş Başlangıç olarak bilinmektedir. Bu isim aslında yanlış ifadedir. Sadece ilk pakette yavaş, sonraki üstel büyümede hızlıdır.
- 321 **“otoritesiz kontrol”**: Bkz. Gordon, “Control without Hierarchy.”
- 321 **Karıncaların çözümünün de benzer**: Bu algoritmaların benzerliklerini birbirine bağlayan bulgular Prabhakar, Dektar ile Gordon’un “The Regulation of Ant Colony Foraging Activity without Spatial Information” çalışmasında yer almaktadır.
- 322 **“Her kamu çalışanı çok acil olarak bir alt göreve indirilmelidir”**: İspanyolca “Todos los empleados públicos deberían descender a su grado inmediato inferior, porque han sido ascendidos hasta volverse incompetentes” olarak sıkça kullanılan bir ifadedir.
- 322 **“yetersiz olana kadar”**: Peter ve Hull, The Peter Principle.
- 323 **hukuk firması Cravath, Swaine&Moore tarafından geliştirilen**: Cravath Sistemi resmi olarak şirketin kendi web sitesinde belgelenmiştir. Bkz. <http://www.cravath.com/cravathsystem/>. Bu sistemin yukarı ya da dışarı isimli bileşeni burada açık bir şekilde anlatılmamıştır fakat başka bir yerde, örneğin Janet Ellen Raasch, “Making Partner-or Not: Is It In, Up or Over in the Twenty-First Century?”, *Law Practice* 33, 4’üncü sayı, Haziran 2007 de yer alan American Bar Association’ın açıklamalarında bahsedilmektedir.
- 323 **ABD Silahlı Kuvvetleri 1980’de**: Bkz. Rostker ve diğerleri, Defense Officer Personnel Management Act of 1980.
- 323 **“insan gücü kontrolü”**: Bkz. Michael Smith, “Army Corporals Forced Out ‘to Save Pension Cash’”, Telegraph, 29 Temmuz 2002.
- 325 **“eş zamanlı olarak hem konuşma hem de dinleme”**: Yngve, “On Getting a Word in Edgewise”.
- 325 **“Dikkati dağınık dinleyicilere zar zor hikâyeler anlatan”**: Bavelas, Coates ve Johnson, “Listeners as Co-Narrators.”

- 326 **bilginin akışını düzenlemede:** Tolins ve Fox Tree, “Addressee Backchannels Steer Narrative Development”.
- 326 **“Gerçekten bazı ‘hikâye anlatıcıları’ diğerlerinden kötü de olsalar... dinleyenleri suçlayabilirler”:** Jackson Tolins, kişisel görüşmelerden, 15 Ocak 2015.
- 326 **“yanlış düşünceler nedeniyle”:** Nichols ve Jacobson, “Controlling Queue Delay”.
- 327 **Hâlen kullanımda olan HTTP’nin:** Bu HTTP 1.1 dir, 1999 Ocak ayına ait RFC 2616 belgesi, <http://tools.ietf.org/html/rfc2616> .
- 327 **“arşiv dosyalarını kopyalıyor ya da yeniden senkronize ediyordum”:** Jim Gettys, “Bufferbloat: Dark Buffers in the Internet”, Google Tech Konuşması, 26 Nisan 2011.
- 327 **“‘Evreka!’ değil, ‘İşte bu komik’tir.’”:** Bu alıntının Isaac Asimov’a atfedildiği pek çok yayında görülmüştür ama gerçek sahibi hâlen bilinmemektedir. İlk olarak ünlü kişilerin sözlerini fal kurabiyelerinden çıkarmışçasına gösteren bir UNIX fal programında görülmüştür. Bkz. <http://quoteinvestigator.com/2015/03/02/eureka-funny/>. Asimov Evreka Olgusu isimli bir yazı hazırlamıştır ancak bu söz o çalışmada yer almamıştır.
- 330 **rutin bir şekilde sıfırlandıkları zaman:** Bkz. Nichols ve Jacobson, “Controlling Queue Delay”.
- 331 **memleketi olan California eyaletinde:** ABD Nüfus İdaresi’nin California’nın nüfusuna ilişkin 2015 tahmini 39.144.818’dir. Bkz. <http://www.census.gov/popest/data/state/totals/2015/index.html> .
- 332 **“mesaj bırakmanın gerçekten güzel bir yolu yoktu”:** Ray Tomlinson, Jesse Hicks tarafından yapılan röportajından, “Ray Tomlinson, the Inventor of Email: ‘I See Email Being Used, by and Large, Exactly the Way I Envisioned,’” Verge, 2 Mayıs 2012, <http://www.theverge.com/2012/5/2/2991486/ray-tomlinson-email-inventor-interview-i-see-email-being-used>.
- 333 **gelen tüm e-postaları reddedecek şekilde:** Örneğin benzer bir yaklaşım Sheffield Üniversitesi’nden düşünür Tom Stafford tarafından geliştirilmiştir. 2015 senesindeki tatili sırasında kullandığı otomatik e-posta cevabı şu şekildeydi: “12 Hazirana kadar tatildeyim. t.stafford@shef.ac.uk adresine gönderilen orijinal mesaj silinmiştir.”
- 334 **uzun yıllardır gelen ilk iyileştirme çabası:** Stuart Cheshire, kişisel görüşmelerden, 26 Şubat 2015.

- 334 **“Bu uzun vadeli bir uğraş”**: Jim Gettys, kişisel görüşmelerden, 15 Temmuz 2014.
- 335 **“Peki bu durumda bir Boeing 747, Boeing 737’den üç kat ‘daha hızlı’ der misiniz? Elbette ki hayır”**: Bu söz Cheshire’nin 1996 senesindeki meşhur “It’s the Latency, Stupid” eserinden gelmektedir. Bkz. <http://rescomp.stanford.edu/~cheshire/rants/Latency.html>. Yirmi sene sonra duygu sadece daha da gerçek hâle gelmiştir.

11. Oyun Teorisi (Game Theory)

- 337 **“İnsanların asil ve onurlu olduklarına, ... inanmak bakımından bir iyimserim”**: Steve Jobs, Gary Wolf ile olan röportajından, Wired, 1996 Şubat.
- 338 **İnsan-doğa**: 21’inci yüzyıldaki öğrenciler giderek artan bir şekilde “insan-insan”, “insan-doğa” ve “insan-toplum” gibi konular hakkında öğrenmektedirler.
- 338 **“zeki bir kişi zehri kendi kadehine koyar”**: The Princess Bride, William Goldman yapımı film; 20th Century Fox, 1987.
- 339 **“başarılı bir yatırımın başkalarının beklentilerini önceden görmek”**: Gregory Bergman’ın Isms eserinde Keynes’e atfedilmiştir, Adams Media, 2006.
- 339 **“durma problemi (halting problem)”**: Alan Turing durma problemi ni göz önüne almıştır, “On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem” ve “On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. A Correction”.
- 340 **“poker oyuncularına buna ‘seviyelendirme’ derler”**: Dan Smith, kişisel görüşmelerden, 11 Eylül 2014.
- 341 **“Elinde 2 ve 7 yok”**: Bu durum 17-19 Kasım 2007’da Londra’daki Les Ambassadeurs Club’da yapılan “Full Tilt Poker Million Dollar Challenge” turnuvasında yaşanmış ve Sky Sports kanalında yayınlanmıştı.
- 341 **“Rakibinizden sadece bir seviye üstte oynamak isteyeceğinize dair bir kural vardır.”**: Vanessa Rousso, “Leveling Wars,” <https://www.youtube.com/watch?v=Yt5ALnFrwR4>.
- 342 **“Her zaman Nash’in ne olduğunu bilerek ya da bilmeye çalışarak”**: Dan Smith, kişisel görüşmelerden, 11 Eylül 2014.

- 342 **denge denen bir durumu:** Oyun teorisindeki teorik denge konsepti ve bu nedenle de oyun teorisinin kendisi Princeton'dan John von Neumann ve Oskar Morgenstern'in Theory of Games and Economic Behavior eserinden gelmektedir.
- 343 **Örneğin taş-kâğıt-makas oyununda:** Bu oyunun renkli anlatımına ve çeşitli versiyonlarına bakmak için size önerimiz: <http://worldrps.com>. Bilgisayarda taş-kâğıt-makas oyunu için bkz. taş-kâğıt-makas programlama yarışması: <http://www.rpscontest.com>.
- 343 **rastgele bu üç el hareketinden birini:** Bunun gibi rastlantısallığı olaya dâhil eden bir stratejiye "karışık" strateji denir. Bunun alternatifi ise her zaman aynı seçeneği seçen "saf" bir stratejidir: Bu strateji tabi ki uzun süreli bir taş-kâğıt-makas oyununda işe yaramayacaktır. Karışık stratejiler özellikle sıfır toplamli oyunlarda olacak şekilde pek çok oyunda dengenin bir bölümü olarak karşımıza çıkar.
- 343 **her iki oyunculu oyunun en az bir denge noktası olduğunu:** Nash, "Equilibrium Points in N-Person Games"; Nash, "Non-Cooperative Games."
- 343 **bir Nash dengesinin iki oyunculu oyunlarda her zaman var olması gerçeği:** Tam olarak ifade etmek gerekirse; a.g.e. Sınırlı sayıda oyuncu ve sınırlı sayıda strateji olan her oyunun en az bir karma stratejili dengesi olduğunu kanıtlamıştır.
- 344 **"temel ve büyük bir etkisi vardır":** Myerson, "Nash Equilibrium and the History of Economic Theory".
- 344 **"bir bilgisayar mühendisinin en önemli kaygısı":** Papadimitriou, "Foreword".
- 344 **"Bize kullanabileceğimiz bir şeyler verin":** Tim Roughgarden, "Algorithmic Game Theory, Lecture 1 (Introduction)," 2013 Sonbahar dönemi, https://www.youtube.com/watch?v=TM_QFmQU_VA.
- 344 **tümünün çözümsüz problemler olduğu:** Gilboa ve Zemel, "Nash and Correlated Equilibria."
- 345 **Nash dengesini bulmanın da çözümsüz olduğunu kanıtlamışlardır:** Özellikle belirtmek gerekirse Nash dengesinin PPAD denilen bir problem sınıfına ait olduğu (NP gibi) gösterilmiş ve çözümsüz olduğuna inanılmaktadır. Nash dengesi ile PPAD arasındaki bağlantı Dasgakis, Goldberg ile Papadimitriou'nun "The Complexity of Computing a Nash Equilibrium" ve Goldberg ile Papadimitriou'nun "Reducibility Between Equilibrium Problems," çalışmalarında tesis

edilmiştir ve daha sonra da Chen ile Deng'in "Settling the Complexity of Two-Player Nash Equilibrium," çalışması ile iki kişilik oyunlar için genişletilmiş, daha sonra ise Daskalakis, Goldberg ile Papadimitriou'nun "The Complexity of Computing a Nash Equilibrium." çalışması ile daha da genelleştirilmiştir.

PPAD, arasında n boyutta $2n$ sayıda noktanın olduğu n sayıda kümenin olduğu ve bunları tam olarak ikiye bölen düzlemi bulmayı amaçlayan sandviç problemi gibi başka ilginç problemleri de içermektedir. Nash dengesini bulma aslında PPAD-tamdır ve bunun anlamı eğer bunu çözmek için verimli bir algoritma olsaydı o zaman bu sınıftaki diğer tüm problemler de verimli bir şekilde çözülebilir. Ancak PPAD-tam olmak NP-tam olmak kadar kötü bir şey değildir.

- 345 **"rasyonel tarafların davranışlarının tahmini olarak güvenilirliği kaybolur"**: Christos Papadimitriou, "The Complexity of Finding Nash Equilibria," in Nisan ve diğerleri, Algorithmic Game Theory.
- 345 **"ilgili olarak kabul edilmelidir"**: Aaronson, "Why Philosophers Should Care About Computational Complexity."
- 345 **"Eğer dizüstü bilgisayarınız bunu bulamıyorsa, pazar da bulamaz"**: Christos Papadimitriou, "The Complexity of Finding Nash Equilibria," Nisan ve diğerleri, Algorithmic Game Theory, sf. 30.
- 346 **"Tutsak ikilemi"**: Tutsak ikilemi ilk olarak Merrill Floyd (sekreter ve gezgin satıcı problemleri ile tanınan) ve RAND Corporation'dan Melvin Drescher tarafından ortaya atılmıştır. 1950 Ocak ayında, UCLA'dan Armen Alchian ile RAND'dan John D. Williams aralarında tutsak ikilemi içeren bir oyun düzenlemişlerdir (Flood, "Some Experimental Games"). Princeton'dan Albert Tucker bu deneyle ilgilenmiş ve Mayıs ayında Stanford'da vereceği bir derse bu konuyu dâhil etme hazırlıkları sırasında şimdiki meşhur hapisane formülizasyonunu ve ismini vermiştir. Oyun teorisi ve bunun RAND kuruluşunda gelişmesinin geniş bir geçmişi Poundstone'nun *Prisoner's Dilemma* eserinde bulunabilir.
- 348 **sadece 4/3 değerinde bir anarşi bedeli**: Roughgarden ve Tardos, "How Bad Is Selfish Routing?" Roughgarden'ın 2002 senesinde Cornell Üniversitesi'ndeki doktora çalışması da bu konuya değinmektedir.

- 349 **“herkesin sürülerine açık ama sınırlı bir kapasitesi olan ‘ortak’ kamu otlaklarını düşünmeye çağırdı:** Hardin, “The Tragedy of the Commons”.
- 350 **“kurşunlu benzin diye bir şey vardı”:** Avrim Blum, kişisel görüşmelerden, 17 Aralık 2014.
- 350 **“dünyada çalışmanın değerinin daha fazla, boş zamanın değerinin daha az olduğu başka yer yoktur”:** “In Search of Lost Time,” Economist, 20 Aralık 2014.
- 351 **Yüzde 15’inin hiç izin kullanmadığını göstermiştir:** Çalışma Glassdoor’dan alınmıştır ve a.g.e. de atıfta bulunulmuştur.
- 351 **“izin alırken tereddüt edecektir”:** Mathias Meyer, “From Open (Unlimited) to Minimum Vacation Policy,” 10 Aralık 2014, <http://www.paperplanes.de/2014/12/10/from-open-to-minimum-vacation-policy.html>.
- 352 **“Dükkânlar daha önce hiç açılmadıkları kadar erken açılmakta”:** Nicole Massabrook, “Stores Open on Thanksgiving 2014: Walmart, Target, Best Buy and Other Store Hours on Turkey Day,” International Business Times, 26 Kasım 2014.
- 352 **“Oyuncudan nefret etmeyin, oyundan nefret edin”:** Ice-T, “Don’t Hate the Playa,” The Seventh Deadly Sin, 1999.
- 352 **“Bir daha asla aileden birinin karşısında taraf olmayın, asla.”:** Baba filminden (The Godfather), Mario Puzo ve Francis Ford Coppola, Paramount Pictures, 1972.
- 353 **“oyun iş birliği olmaması üzerine kurulmuş gibidir”:** Binmore’un bu sözü aralarında Binmore’un Natural Justice ve Game Theory çalışmalarının da olduğu pek çok kaynakta karşımıza çıkmaktadır.
- 354 **tatil yapmaları durumunda 1.000 dolar nakit:** Libin 1.000 dolarlık teşviki Adam Bryant ile olan röportajı “The Phones Are Out, but the Robot Is In,” New York Times, 7 Nisan 2012 tarihli röportaj gibi yerlerde anlatmaktadır.
- 355 **küçük bir tatil süresini zorunlu yapabilir:** Zorunlu izin finans alanında çalışanlarda zaten standart bir uygulamadır ama moralden ziyade dolandırıcılık araştırmaları için kullanılır. Bu konularda daha fazla bilgi için bkz. Philip Delves Broughton, “Take Those Two Weeks Off or Else”, Wall Street Journal, 28 Ağustos 2012.
- 355 **ücretli izne ilişkin federal gereksinimleri olmayan:** Rebecca Ray, Milla Sanes ve John Schmitt, “No-Vacation Nation Revisited,” Center

for Economic Policy and Research, Mayıs 2013, <http://www.cepr.net/index.php/publications/reports/no-vacation-nation-2013>.

- 356 **Bir Bilgisayar Mühendisinin Nadiren Konuştuğu Şeyler:** (Things a Computer Scientist Rarely Talks About): Donald E. Knuth.
- 357 **“Kalbin kendine has, aklın bile bilgisinin olmadığı bir mantığı vardır”:** Pascal, *Pensées sur la religion et sur quelques autres sujets*, §277.
- 357 **“havada asılı bir çayır”:** Dawkins, *The Evidence for Evolution*.
- 359 **farelerin kedi korkularından kalıcı olarak kurtulmalarına:** Ingram ve diğerleri, “Mice Infected with Low- Virulence Strains of Toxoplasma Gondii”.
- 359 **“Ahlak, bireydeki sürü psikolojisi”:** *The Gay Science*, §116, Walter Kaufmann.
- 359 **“Eğer insanlar mallarımızı çalan bir kişiye karşı mantıklı olmayan bir şekilde karşılık vermemizi beklerlerse”:** Frank, *Passions within Reason*.
- 360 **“İnsanların ilişkilerini ileride mantıklı olmayabileceği nedeniyle bırakacakları endişesi”:** a.g.e.
- 361 **“anlama benzeri bir şeye ihtiyaç duymazsınız, hem de objektif bir şekilde daha iyi bir seçenek ile karşılaşsanız bile”:** Robert Frank, kişisel görüşmelerden, 13 Nisan 2015. Frank’ın “If Homo Economicus Could Choose” çalışması bu fikri de içerir fakat bu çalışmasında fikirlerini Schelling, *The Strategy of Conflict*; Schelling, “Altruism, Meanness, and Other Potentially Strategic Behaviors”; Akerlof, “Loyalty Filters”; Hirshleifer, “On the Emotions as Guarantors of Threats and Promises”; Sen, “Goals, Commitment, and Identity”; ve de Gauthier, *Morals by Agreement* gibi çalışmaların üzerine kurduğunu söyler. Frank fikirlerini bir kitap uzunluğundaki *Passions within Reason* isimli çalışmasında paylaşmaktadır.
- 361 **“Eğer mahkum mutluyrsa, onu neden içeride kalması için kilitliyoruz?”:** Shaw, *Man and Superman*.
- 363 **Google’ın gelirinin yüzde 90’ından fazlasını reklam satışlarından:** Google’ın 2014 reklam geliri (hissedar raporlarında detayları yer aldığı şekliyle) 59,6 milyar dolar civarında, kabaca toplam gelirinin yüzde 90,3’ü kadardı. Bkz. <https://investor.google.com/financial/tables.html>.

- 363 **gelir olarak on milyarlar kazanır:** 29 Ocak 2015 tarihinde kapanan AWS-3 artırması toplamda 44.899 milyar dolarla kapandı. Bkz. http://wireless.fcc.gov/auctions/default.htm?job=auction_factsheet&id=97.
- 363 **onlar da sizin değerlendirmenize dair tahminlerine bağlı olarak kendi tekliflerini gözlemlemektedirler!:** Kapalı zarflı birinci teklifin kazandığı iki oyunculu bir açık artırma için denge stratejisi; düşündüğünüz tam değer yarısı kadar teklif vermektir. Daha da genellemek gerekirse n oyuncunun olduğu bu açık artırma formatında $[(n-1)/n]$ oranında teklif vermelisiniz. Burada bu stratejinin baskın bir strateji olmadığına, sadece bir Nash dengesi olduğuna dikkat ediniz; yani eğer herkes bunu yaparsa başka hiçbir şey daha iyi bir strateji değildir ancak tüm durumlarda da optimal strateji olmak zorunda değildir. Ayrıca eğer açık artırmadaki teklif verenlerin sayısını bilmiyorsanız, optimal strateji bir anda karmaşıklaşır; bakınız: An, Hu ve Shum, “Estimating First-Price Auctions with an Unknown Number of Bidders: A Misclassification Approach.” Aslında kolayca ortada olan sonuçlar $[(n-1)/n]$ - bazı ciddi varsayımlar gerektirir; isim vermek gerekirse teklif verenlerin “risk nötral” olmaları ve satışta olan nesne için farklı değerlendirmelerinin belirli bir alanda eşit bir şekilde dağılmış olmaları gerekir. Buradaki $[(n-1)/n]$ sonucu şuradan gelmektedir: Vickrey, “Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders.”
- 364 **Çiçek Açık Eksiltmesi:** Aalsmeer Çiçek Açık Eksiltmesi hakkında daha fazla bilgi için bkz. <http://www.ora holland.com/en/about-floraholland/visit-the-flower-auction/>.
- 365 **hiçbir şey olmayacakmış gibi bir uçurumdan aşağı gidiyor olması:** Bazen kelimenin tam anlamı ile uçurumlar kullanılmaktadır. Örneğin *The New York Times* gazetesi Washington eyaletinde tecrübeli bazı kayakçıların öldüğünü bildirmiştir. Hayatta kalanlardan alınan bilgilere göre olayda neredeyse hemen her kayakçının aslında kişisel olarak içinde kötü bir his olan yerden gidildiği öğrenilmiştir.
- Hayatta kalanlardan biri “Eğer bana kalsaydı, 12 kişi ile böyle bir kayak gezisine gitmezdim. Ama bilirsiniz işte; ‘Bu çok kalabalık bir grup ve bunu bu şekilde yapmamalıyız’ diyen ben olmak istemedim” demiştir.

Bir diğerk kişi ise “Böylesi kalabalık bir grubun zekice olmayan bir karar verme ihtimali yoktu. Elbette ki hepimiz gittiğimiz için sorun olmayacaktı” demiştir.

Üçüncü bir kişi de “Aklımdan her şey geçiyordu ve onlara durmalarını söylemek istiyordum” demişti.

Bu geziden hayatta kalan dördüncü bir kişi ise “Oh, burası gelmek için kötü bir yer diye düşünmüştüm. ama hiçbir şey söylemedim, oyun bozan olan ben olmak istemedim” demişti. Bkz. Branch, “Snow Fall.”

- 365 **“bilgi sağanağı” olarak bilinecektir:** Bikhchandani, Hirshleifer ve Welch, “A Theory of Fads.” Ayrıca bakınız: Bikhchandani, Hirshleifer ve Welch, “Learning from the Behavior of Others.”
- 366 **“Artık ortak bilgi havuzu büyümektedir.”:** David Hirshleifer, kişisel görüşmelerden, 27 Ağustos 2014.
- 366 **23 milyon doların üzerinde bir satış fiyatına ulaşmıştı:** Amazon satış ürünün fiyatlandırması Berkeley Üniversitesi biyologlarından Michael Eisen tarafından bildirilmiştir. Bkz. “Amazon’s \$23,698,655.93 book about flies,” 23 Nisan 2011, Eisen’in blogu, <http://www.michaeliseisen.org/blog/?p=358>.
- 367 **pazarın rasyonel olmayan özelliğini daha da kötüleştirildiğinden:** Sethi, “Algorithmic Trading and Price Volatility.”
- 369 **tüm sürüyü bir felaketten kurtaracağınız zaman gelecektir:** Bu durum aynı zamanda mekanizma tasarımı ve evrim açısından da düşünülebilir. Ortalama bir birey için genelde tedbirli bir sürü takip eden kişi olmak daha iyidir, ancak yine de burnunun dikine giden kişilerden sürüdeki diğerleri de faydalanır. Bu şekilde kendine aşırı derecede güvenmek sosyal fedakârlığın bir şekli olarak da düşünülebilir. “Sosyal optimal oran” üzerine daha fazla bilgi için bakınız: Bernardo ve Welch, “On the Evolution of Overconfidence and Entrepreneurs.”
- 369 **mekanizma tasarımı üzerine yeniden düşünmek için:** “algoritmik mekanizma tasarımı” teknik literatüre ilk olarak Nisan ve Ronen’in “Algorithmic Mechanism Design” çalışması ile girmiştir.
- 369 **Vickrey usulü açık artırma denir:** Bkz. Vickrey, “Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders.”
- 370 **“stratejilere karşı dayanıklı” ya da sadece “gerçekçi”:** “Stratejilere karşı dayanıklı” oyunlar aynı zamanda “teşvik uyumlu” olarak da bilinirler. Bakınız Noam Nisan, “Introduction to Mechanism Design

(for Computer Scientists),” Nisan ve diğerleri, Algorithmic Game Theory.

- 370 **dürüstlük baskın stratejidir:** Oyun teorisi açısından bakıldığında, bu durum Vickrey açık artırma usulünü “baskın strateji ve teşvik uyumlu” kılar. Ve “Myerson’un yardımcı teoremi” olarak da bilinen algoritmik oyun teorisinde önemli bir sonuç; bu şekilde sadece bir ödeme mekanizmasının mümkün olduğunu söyler. Bu, Vickrey açık artırma usulünün sadece stratejik yinelemelerden ya da dürüst olmayan davranışlardan kaçınmak için bir yol olmadığı, aynı zamanda tek yol olduğu anlamına gelir. Bakınız: Myerson, “Optimal Auction Design.”
- 371 **“gelir dengeleme” denilen bir oyun teorisi prensibi:** Gelir dengeleme teoremi Vickrey’in “Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders” çalışması ile ortaya çıkmış ve Myerson’un “Optimal Auction Design,” ve Riley ile Samuelson’ın “Optimal Auctions” çalışmaları ile genelleştirilmiştir.
- 371 **Vickrey açık artırma usulü “harikadır”:** Tim Roughgarden, “Algorithmic Game Theory, Lecture 3 (Myerson’s Lemma),” 2 Ekim 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=9qZwchMuslk>.
- 371 **“Bunun gerçekten harikulade olduğunu düşünüyorum”:** Noam Nisan, kişisel görüşmelerden, 13 Nisan 2015.
- 371 **“görebileceğiniz en iyi şeylerden birine”:** Paul Milgrom, kişisel görüşmelerden, 21 Nisan 2015.
- 372 **“Cehennem başkalarıdır”:** Sartre, No Exit.

Sonuç

- 374 **“insanlara birlikte nasıl iyi bir şekilde yaşanılacağını öğrenmek için”:** Flood, “What Future Is ere for Intelligent Machines?”
- 375 **“Buna en akıllıca olan eylem diyeceğim”:** Russell, “The Elements of Ethics.”
- 375 **Buna bilişim açısından bir tür sebat göstermek de diyebiliriz :** Bkz. Baltzly, “Stoicism.”
- 376 **iyi bir şarkıyı duyduğunuz anda:** Bu aynı zamanda P ve NP zor sınıfları arasındaki fark gibidir. Bu konuda daha fazla felsefi bilgi için bakınız: Aaronson, “Reasons to Believe,” ve Wigderson, “Knowledge, Creativity, and P versus NP.”

- 377 **hiçbirinin gerçekte boğa güreşini izlemek istemedikleri:** Bunun gibi senaryolar bazen “Abilene paradoksu” adı altında da görülmektedir. Bkz. Harvey, “The Abilene Paradox.”
- 378 **grubu bir çözüme doğru:** Bu tespit aynı zamanda Tim Ferriss tarafından da yapılmıştır. Ferriss şöyle demektedir: “Çözüm için öneri istemekten vazgeçin ve çözüm önermeye başlayın. Küçük şeylerle başlayın. Önümüzdeki hafta kim buluşmak ister diye sormak yerine kendi ideal zamanınızı teklif edin ve ikinci seçeneğinizi de söyleyin. Eğer birisi ‘Nerede yiyeceğiz’, ‘Hangi filme gidelim’, ‘Bu akşam ne yapalım’ ya da benzer şeyler sorarsa onlara ne yapalım demeyin, bir şeyler önerin.” Bakınız: Ferriss, The 4-Hour Workweek.
- 378 **bir ya da iki somut seçenek sunmak:** İdeal olarak, bir kişi gruptaki her kesin tüm seçeneklere verdiği değeri bilmek ve bunlara dayalı bir karar vermek ister. Muhtemel bir yaklaşım herkesin verdiği değerlerin çarpımının en yüksek olduğu seçeneği tercih etmektir, bu aynı zamanda veto yetkisinin bir kişinin sıfır vermesi ile uygulanabildiği bir yaklaşımdır. Ekonomistler arasında bunun iyi bir strateji olduğuna dair John Nash’e kadar uzanan bir tartışma mevcuttur. Bakınız: Nash, “The Bargaining Problem.”
- 378 **bozuk parayı minimize edeceği:** Shallit, “What is Country Needs Is an 18¢ Piece.”
- 378 **18 sentlik bir bozuk paraydı:** Lueker’in “Two NP-Complete Problems in Nonnegative Integer Programming” isimli çalışması belirli varsayımlar altında en az sayıdaki bozuk para ile para üstü vermenin NP zor bir problem olduğunu göstermiştir. Bu sonuç bozuk paraların onluk tabanda olduğu durumlar için geçerlidir, ancak eğer birlik tabanda olurlarsa bu problemin verimli bir çözümü mevcuttur. Bu sonuç Wright’ın “The Change-Making Problem” çalışmasında gösterilmiştir. Para üstü probleminin karmaşıklığı konusunda daha fazla bilgi için bakınız: Kozen ve Zaks, “Optimal Bounds for the Change-Making Problem.”
- 379 **büyük bir otopark düşünün:** Cassidy ve Kobza’nın “A Probabilistic Approach to Evaluate Strategies for Selecting a Parking Space” çalışması “Pick a Row, Closest Space (PRCS)” ve “Cycling (CYC)” algoritmalarını karşılaştırmaktadır. Daha karmaşık olan CYC optimal bir durma kuralı içermektedir, PRCS ise varış noktasından başlar, uzağa doğru döner ve basit bir şekilde ilk boş yeri alır. Daha agresif olan

CYC ortalama olarak daha iyi yerler bulur ancak daha basit olan PRCS aslında harcanan zaman anlamında daha iyi sonuçlar verir. CYC algoritmasını kullanan sürücüler, buldukları yerlerden yürüyüş için geçen zamandan daha fazlasını bulmak için harcamışlardır. Yazarlar bu yapıdaki araştırmaların otopark tasarımında faydalı olabileceğine işaret etmektedir. Park alanları için hesaplama modelleri Benenson, Martens ve Birfer'in "PARKAGENT: An Agent-Based Model of Parking in the City" gibi çalışmalarda da ele alınmıştır.

- 381 **“dönme” ve “engelleme”**: Bu konuda daha fazla bilgi için bkz. Boguslavsky ve diğerleri, “Optimal Strategies for Spinning and Blocking”. (Bu kişinin 1’nci bölümde su kayağı konusunda karşılaştığımız Leonid Boguslavsky olduğuna dikkat ediniz.)

Bibliyografiya

- Aaronson, Scott. "Reasons to Believe" Shtetl-Optimized (blog), 4 Eylül 2006. <http://www.scottaaronson.com/blog/?p=122/>.
- . "Why Philosophers Should Care About Computational Complexity." arXiv preprint arXiv:1108.1791, 2011.
- Abramson, Norman. "The ALOHA System: Another Alternative for Computer Communications." 17–19 Kasım 1970, Fall Joint Computer Conference, 1970, 281–285.
- Ackley, David H. "Beyond Efficiency." *Communications of the ACM* 56, no. 10 (2013): 38–40.
- Agrawal, Manindra, Neeraj Kayal, ve Nitin Saxena. "PRIMES Is in P." *Annals of Mathematics* 160 (2004): 781–793.
- Agrawal, Rajeev. "Sample Mean Based Index Policies with $O(\log n)$ Regret for the Multi-Armed Bandit Problem." *Advances in Applied Probability* 27 (1995): 1054–1078.
- Agrawal, Shipra, ve Navin Goyal. "Analysis of Thompson Sampling for the Multi-armed Bandit Problem." In *Proceedings of the 25th Annual Conference on Learning Theory*, 2012.
- Akerlof, George A. "Loyalty Filters." *American Economic Review* 1983, 54–63.
- Allen, David. *Getting Things Done: The Art of Stress-Free Productivity*. New York: Penguin, 2002.
- Aloupis, Greg, Erik D. Demaine, and Alan Guo. "Classic Nintendo Games Are (NP-) Hard." arXiv preprint arXiv:1203.1895, 2012.
- An, Yonghong, Yingyao Hu ve Matthew Shum. "Estimating First-Price Auctions with an Unknown Number of Bidders: A Misclassification Approach." *Journal of Econometrics* 157, no. 2 (2010): 328–341.
- Anderson, John R. *The Adaptive Character of Thought*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1990.
- Anderson, John R., ve Robert Milson. "Human Memory: An Adaptive Perspective." *Psychological Review* 96, no. 4 (1989): 703–719.
- Anderson, John R., ve Lael J. Schooler. "Reflections of the Environment in Memory." *Psychological Science* 2, no. 6 (1991): 396–408.
- Ariely, Dan, ve Simon Jones. *Predictably Irrational*. New York: HarperCollins, 2008.
- Arrhenius, Gustaf. "An Impossibility Theorem in Population Axiology with Weak Ordering Assumptions." *Philosophical Studies* 49 (1999): 11–21.
- Auer, Peter, Nicolò Cesa-Bianchi, ve Paul Fischer. "Finite-Time Analysis of the Multiarmed Bandit Problem." *Machine Learning* 47 (2002): 235–256.
- Austen, Jane. Emma. London: John Murray, 1815.
- Austrian, Geoffrey D. Herman Hollerith: *Forgotten Giant of Information Processing*. New York: Columbia University Press, 1982.
- Bachmann, Paul. *Die analytische Zahlentheorie*. Leipzig: Teubner, 1894.
- Badger, Lee. "Lazzarini's Lucky Approximation of π ." *Mathematics Magazine* 67 (1994): 83–91.
- Bailey, Arthur L. *Credibility Procedures: Laplace's Generalization of Bayes' Rule and the Combination of Collateral Knowledge with Observed Data*. New York: New York State Insurance Department, 1950.
- Baker, Kenneth R. *Introduction to Sequencing and Scheduling*. New York: Wiley, 1974.

- Baker, Kenneth R., Eugene L. Lawler, Jan Karel Lenstra, ve Alexander H. G. Rinnooy Kan. "Preemptive Scheduling of a Single Machine to Minimize Maximum Cost Subject to Release Dates and Precedence Constraints." *Operations Research* 31, no. 2 (1983): 381–386.
- Baltzly, Dirk. "Stoicism." *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2014). Edward N. Zalta. <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/stoicism/>.
- Banks, Jeffrey S., ve Rangarajan K. Sundaram. "Switching Costs and the Gittins Index." *Econometrica* 62 (1994): 687–694.
- Barabási, Albert-László. *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*. New York: Penguin, 2002.
- Baran, Paul. "On Distributed Communications." Volumes I–XI, RAND Corporation Research Documents, 1964 Ağustos, 637–648.
- Barnard, Chester I. *The Functions of the Executive*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1938.
- Bartlett, Robert H., Dietrich W. Rolo, Richard G. Cornell, Alice French Andrews, Peter W. Dillon, ve Joseph B. Zwischenberger. "Extracorporeal Circulation in Neonatal Respiratory Failure: A Prospective Randomized Study." *Pediatrics* 76, no. 4 (1985): 479–487.
- Baumgardt, Carola. *Johannes Kepler: Life and Letters*. New York: Philosophical Library, 1951.
- Bavelas, Janet B., Linda Coates, ve Trudy Johnson. "Listeners as Co-Narrators." *Journal of Personality and Social Psychology* 79, no. 6 (2000): 941–952.
- Bz yes, Thomas. "An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances." *Philosophical Transactions* 53 (1763): 370–418.
- Bearden, Neil. "A New Secretary Problem with Rank-Based Selection and Cardinal Payoffs." *Journal of Mathematical Psychology* 50 (2006): 58–59.
- Bélády, Laszlo A. "A Study of Replacement Algorithms for a Virtual-Storage Computer." *IBM Systems Journal* 5 (1966): 78–101.
- Bélády, Laszlo A., Robert A Nelson, ve Gerald S. Shedler. "An Anomaly in Space-Time Characteristics of Certain Programs Running in a Paging Machine." *Communications of the ACM* 12, no. 6 (1969): 349–353.
- Belew, Richard K. *Finding Out About: A Cognitive Perspective on Search Engine Technology and the WWW*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- Bell, Aubrey F. G. *In Portugal*. New York: John Lane, 1912.
- Bellhouse, David R. "The Reverend Thomas Bayes, FRS: A Biography to Celebrate the Tercentenary of His Birth." *Statistical Science* 19 (2004): 3–43.
- Bellman, Richard. *Dynamic Programming*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1957.
- . "A Problem in the Sequential Design of Experiments." *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics* 16 (1956): 221–229.
- Bellows, Meghan L., ve J. D. Luc Peterson. "Finding an Optimal Seating Chart." *Annals of Improbable Research* (2012).
- Benenson, Itzhak, Karel Martens, ve Slava Birfer. "PARKAGENT: An Agent-Based Model of Parking in the City." *Computers, Environment and Urban Systems* 32, no. 6 (2008): 431–439.
- Berezovsky, Boris, ve Alexander V. Gnedin. *Problems of Best Choice* (in Russian). Moscow: Akademia Nauk, 1984.
- Berg-Kirkpatrick, Taylor, ve Dan Klein. "Decipherment with a Million Random Restarts." In *Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing* (2013): 874–878.

- Bernardo, Antonio E., ve Ivo Welch. "On the Evolution of Overconfidence and Entrepreneurship." *Journal of Economics & Management Strategy* 10, no. 3 (2001): 301–330.
- Berry, Donald A. "A Bernoulli Two-Armed Bandit." *Annals of Mathematical Statistics* 43 (1972): 871–897.
- . "Comment: Ethics and ECMO." *Statistical Science* 4 (1989): 306–310.
- Berry, Donald A., ve Bert Fristedt. *Bandit Problems: Sequential Allocation of Experiments*. New York: Chapman and Hall, 1985.
- Bettencourt, Luís M. A., José Lobo, Dirk Helbing, Christian Kühnert, ve Geoffrey B. West. "Growth, Innovation, Scaling, and the Pace of Life in Cities." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, no. 17 (2007): 7301–7306.
- Bikhchandani, Sushil, David Hirshleifer, ve Ivo Welch. "A Theory of Fads, Fashion, Custom, and Cultural Change as Informational Cascades." *Journal of Political Economy* 100, no. 5 (1992): 992–1026.
- . "Learning from the Behavior of Others: Conformity, Fads, and Informational Cascades." *Journal of Economic Perspectives* 12, no. 3 (1998): 151–170.
- Binmore, Ken. *Game Theory: A Very Short Introduction*. New York: Oxford University Press, 2007.
- . *Natural Justice*. New York: Oxford University Press, 2005.
- Bjarnason, Ronald, Alan Fern, ve Prasad Tadepalli. "Lower Bounding Klondike Solitaire with Monte-Carlo Planning." In *Proceedings of the 19th International Conference on Automated Planning and Scheduling, ICAPS 2009*.
- Blau, Peter Michael. *The Dynamics of Bureaucracy: A Study of Interpersonal Relations in Two Government Agencies*. Chicago: University of Chicago Press, 1955.
- Bloom, Burton H. "Space/Time Trade-offs in Hash Coding with Allowable Errors." *Communications of the ACM* 13, no. 7 (1970): 422–426.
- Boguslavsky, Leonid, Karim Harzallah, A. Kreinen, K. Sevcik, ve Alexander Vainshtein. "Optimal Strategies for Spinning and Blocking." *Journal of Parallel and Distributed Computing* 21, no. 2 (1994): 246–254.
- Boorstin, Daniel J. *The Discoverers: A History of Man's Search to Know His World and Himself*. New York: Random House, 1983.
- Bradt, Russell N., S. M. Johnson, ve Samuel Karlin. "On Sequential Designs for Maximizing the Sum of N Observations." *Annals of Mathematical Statistics* 27 (1956): 1060–1074.
- Branch, John. "Snow Fall: The Avalanche at Tunnel Creek." *New York Times*, December 20, 2012.
- Brown, Alexander L., ve Joanna N. Lahey. *Small Victories: Creating Intrinsic Motivation in Savings and Debt Reduction*. Technical report. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 2014.
- Brush, Eleanor R., David C. Krakauer ve Jessica C. Flack. "A Family of Algorithms for Computing Consensus About Node State from Network Data." *PLoS Computational Biology* 9, no. 7 (2013).
- Bruss, F. Thomas. "A Unified Approach to a Class of Best Choice Problems with an Unknown Number of Options." *Annals of Probability* 12 (1984): 882–889.
- . "What Is Known About Robbins' Problem?" *Journal of Applied Probability* 42, no. 1 (2005): 108–120.
- Bruss, F. Thomas, ve Thomas S. Ferguson. "Half-Prophets and Robbins' Problem of Minimizing the Expected Rank." In *Athens Conference on Applied Probability and Time Series Analysis*, 1–17. New York: Springer, 1996.
- Buch, P. "Future Prospects Discussed." *Nature* 368 (1994): 107–108.
- Buffon, Georges-Louis Leclerc, Comte de. "Essai d'arithmétique morale."

- Supplément à l'Histoire naturelle, générale et particulière 4 (1777): 46–148.
- Burks, Arthur W., Herman H. Goldstine, ve John von Neumann. Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument. Princeton, NJ: Institute for Advanced Study, 1946.
- Burrell, Quentin. "A Simple Stochastic Model for Library Loans." *Journal of Documentation* 36, no. 2 (1980): 115–132.
- Burthe Jr., Ronald. "Further Investigations with the Strong Probable Prime Test." *Mathematics of Computation of the American Mathematical Society* 65, no. 213 (1996): 373–381.
- Cabell, James Branch. *The Silver Stallion*. New York: Robert M. McBride, 1926.
- Campbell, Donald T. "Blind Variation and Selective Retention in Creative Thought as in Other Knowledge Processes." *Psychological Review* 67 (1960): 380–400.
- Carpenter, Brian, ve Robert Hinden. Adaptation of RFC 1149 for IPv6. Technical report. RFC 6214, Nisan 2011.
- Carroll, Lewis. *Sylvie ve Bruno Concluded*. London: Macmillan, 1893.
- Carstensen, Laura L. "Social and Emotional Patterns in Adulthood: Support for Socio-emotional Selectivity eory." *Psychology and Aging* 7 (1992): 331–338.
- Cassady, C. Richard, ve John E. Kobza. "A Probabilistic Approach to Evaluate Strategies for Selecting a Parking Space." *Transportation Science* 32, no. 1 (1998): 30–42.
- Cawdrey, Robert. *A Table Alphabeticall, conteyning and teaching the true writing, and understanding of hard vsuall English wordes, borrowed from the Hebrew, Greeke, Latine, or French, &c. With the interpretation thereof by plaine English words, gathered for the benefit & helpe of ladies, gentlewomen, or any other vnskilfull persons. Whereby they may the more easilie and better vnderstand many hard English wordes, which they shall heare or read in Scriptures, Sermons, or elsewhere, and also be made able to vse the same aptly them-selues*. London: Edmund Weaver, 1604.
- Cayley, Arthur. "Mathematical Questions with Their Solutions." *Educational Times* 23 (1875): 18–19.
- . *The Collected Mathematical Papers of Arthur Cayley* 10: 587–588. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1896.
- Cerf, Vinton G., ve Robert E. Kahn. "A Protocol for Packet Network Intercommunication." *IEEE Transactions on Communications* 22, no. 5 (1974): 637–648.
- Chabert, Jean-Luc, Evelyne Barbin, ve Christopher John Weeks. *A History of Algorithms: From the Pebble to the Microchip*. Berlin: Springer, 1999.
- Charles, Susan T., ve Laura L. Carstensen. "Social and Emotional Aging." *Annual Review of Psychology* 61 (2010): 383–409.
- Chen, Stanley F., ve Joshua Goodman. "An Empirical Study of Smoothing Techniques for Language Modeling." In *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 1996, 310–318.
- Chen, Xi, ve Xiaotie Deng. "Settling the Complexity of Two-Player Nash Equilibrium." In *Foundations of Computer Science*, 2006, 261–272.
- Chow, Y. S., ve Herbert Robbins. "A Martingale System Theorem and Applications." In *Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Berkeley: University of California Press, 1961.
- . "On Optimal Stopping Rules." *Probability Theory and Related Fields* 2 (1963): 33–49.
- Chow, Y. S., Sigaiti Moriguti, Herbert Robbins, ve S. M. Samuels. "Optimal Selection Based on Relative Rank (the 'Secretary Problem')." *Israel Journal*

- of Mathematics 2 (1964): 81–90.
- Christian, Brian. “The A/B Test: Inside the Technology at’s Changing the Rules of Business.” *Wired Magazine* 20, no. 5 (2012).
- Christo des, Nicos. *Worst-Case Analysis of a New Heuristic for the Travelling Salesman Problem*. Technical report 388. Pittsburgh: Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, 1976.
- Churchill, Winston. *Winston S. Churchill: His Complete Speeches, 1897–1963*. Edited by Robert Rhodes James. London: Chelsea House, 1974.
- Cirillo, Francesco. *The Pomodoro Technique*. Raleigh, NC: Lulu, 2009.
- Clarke, Donald D., ve Louis Sokolo . “Circulation and Energy Metabolism of the Brain.” In *Basic Neurochemistry: Molecular, Cellular and Medical Aspects*, 6th ed., edited by George J. Siegel, Bernard W. Agranó , R. Wayne Albers, Stephen K. Fisher, ve Michael D. Uhler. Philadelphia: Lippincott-Raven, 1999, 637–669.
- Clauset, Aaron, Cosma Rohilla Shalizi, ve Mark E. J. Newman. “Power-Law Distributions in Empirical Data.” *SIAM Review* 51, no. 4 (2009): 661–703.
- Cobham, Alan. “The Intrinsic Computational Difficulty of Functions.” In *Proceedings of the 1964 Congress on Logic, Methodology and Philosophy of Science*. Amsterdam: North Holland, 1964.
- Conan Doyle, Arthur. “A Study in Scarlet: The Reminiscences of John H. Watson.” In *Beeton’s Christmas Annual*, vol. 29. London: Ward, Lock, 1887.
- Connor, James A. *Kepler’s Witch: An Astronomer’s Discovery of Cosmic Order Amid Religious War, Political Intrigue, and the Heresy Trial of His Mother*. New York: HarperCollins, 2004.
- Conti, Carl J., Donald H. Gibson, ve Stanley H. Pitkowsky. “Structural Aspects of the System/360 Model 85, I: General Organization.” *IBM Systems Journal* 7 (1968): 2–14.
- Cook, Stephen A. “The Complexity of Theorem-Proving Procedures.” In *Proceedings of the Third Annual ACM Symposium on eory of Computing*, 1971, 151–158.
- Cook, William. *In Pursuit of the Traveling Salesman: Mathematics at the Limits of Computation*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2012.
- Covey, Stephen R. *How to Succeed with People*. Salt Lake City: Shadow Mountain, 1971. Craig, J. V. *Aggressive Behavior of Chickens: Some Effects of Social and Physical Environments*. Presented at the 27th Annual National Breeder’s Roundtable, May 11, Kansas City, MO, 1978.
- Dale, Andrew I. *A History of Inverse Probability: From Thomas Bayes to Karl Pearson*. New York: Springer, 1999.
- Daly, Lloyd W. *Contributions to a History of Alphabetization in Antiquity and the Middle Ages*. Brussels: Latomus, 1967.
- Damgård, Ivan, Peter Landrock, ve Carl Pomerance. “Average Case Error Estimates for the Strong Probable Prime Test.” *Mathematics of Computation* 61, no. 203 (1993): 177–194.
- Daniels, Bryan C., David C. Krakauer, ve Jessica C. Flack. “Sparse Code of Conflict in a Primate Society.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, no. 35 (2012): 14259–14264.
- Darwin, Charles. *The Correspondence of Charles Darwin, Volume 2: 1837–1843*. Edited by Frederick Burkhardt and Sydney Smith. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1987.
- Daskalakis, Constantinos, Paul W. Goldberg, ve Christos H. Papadimitriou. “The Complexity of Computing a Nash Equilibrium.” *ACM Symposium on Theory of Computing*, 2006, 71–78.

- . “The Complexity of Computing a Nash Equilibrium.” *SIAM Journal on Computing* 39, no. 1 (2009): 195–259.
- Davis, Lydia. *Almost No Memory: Stories*. New York: Farrar, Straus & Giroux, 1997.
- Dawkins, Richard. *e Evidence for Evolution, the Greatest Show on Earth*. New York: Free Press, 2009.
- DeDeo, Simon, David C. Krakauer, ve Jessica C. Flack. “Evidence of Strategic Periodicities in Collective Conflict Dynamics.” *Journal of e Royal Society Interface*, 2011.
- DeGroot, Morris H. *Optimal Statistical Decisions*. New York: McGraw-Hill, 1970.
- . “Some Problems of Optimal Stopping.” *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)* 30 (1968): 108–122.
- Demaine, Erik D., Susan Hohenberger, ve David Liben-Nowell. “Tetris Is Hard, Even to Approximate.” In *Computing and Combinatorics*, 351–363. New York: Springer, 2003.
- DeMillo, Richard A., ve Richard J. Lipton. “A Probabilistic Remark on Algebraic Program Testing.” *Information Processing Letters* 7, no. 4 (1978): 193–195.
- Denning, Peter J. “Thrashing: Its Causes and Prevention.” In *Proceedings of the December 9–11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I*, 1968, 915–922.
- Diffie, Whitfield, ve Martin E. Hellman. “New Directions in Cryptography.” *Information Theory, IEEE Transactions on* 22, no. 6 (1976): 644–654.
- Dillard, Annie. *Pilgrim at Tinker Creek*. New York: Harper’s Magazine Press, 1974.
- . *The Writing Life*. New York: Harper & Row, 1989.
- Dodgson, Charles Lutwidge. “Lawn Tennis Tournaments: The True Method of Assigning Prizes with a Proof of the Fallacy of the Present Method.” *St. James’s Gazette*, 1 Ağustos 1883: 5–6.
- Durant, Will. *The Story of Philosophy: The Lives and Opinions of the Greater Philosophers*. New York: Simon & Schuster, 1924.
- Edmonds, Jack. “Optimum Branchings.” *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 71B, no. 4 (1967): 233–240.
- . “Paths, Trees, and Flowers.” *Canadian Journal of Mathematics* 17, no. 3 (1965): 449–467. Erlang.
- Agner Krarup. “Solution of Some Problems in the eory of Probabilities of Significance in Automatic Telephone Exchanges.” *Elektrotekniker* 13 (1917): 5–13.
- . “The eory of Probabilities and Telephone Conversations.” *Nyt Tidsskri for Matematik B* 20, nos. 33–39 (1909): 16.
- Everett III, Hugh. “Generalized Lagrange Multiplier Method for Solving Problems of Optimum Allocation of Resources.” *Operations Research* 11, no. 3 (1963): 399–417.
- Feldman, Dorian. “Contributions to the ‘Two-Armed Bandit’ Problem.” *Annals of Mathematical Statistics* 33 (1962): 847–856.
- Ferguson, Thomas S. *Optimal Stopping and Applications*. <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/2008>.
- . “Stopping a Sum During a Success Run.” *Annals of Statistics* 4 (1976): 252–264.
- . “Who Solved the Secretary Problem?” *Statistical Science* 4 (1989): 282–289.
- Ferguson, Thomas S., Janis P. Hardwick, ve Mitsushi Tamaki. “Maximizing the Duration of Owning a Relatively Best Object.” In *Strategies for Sequential*

- Search and Selection in Real Time, 37–57. Providence: American Mathematical Society, 1992.
- Ferriss, Timothy. *The 4-Hour Workweek*. New York: Crown, 2007.
- Fiore, Neil A. *The Now Habit: A Strategic Program for Overcoming Procrastination and Enjoying Guilt-Free Play*. New York: Penguin, 2007.
- Fisher, Marshall L. "The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems." *Management Science* 27, no. 1 (1981): 1–18.
- Fitzgerald, F. Scott. "The Crack-Up." *Esquire* 5, nos. 2–4 (1936).
- . *The Crack-Up with Other Uncollected Pieces*. New York: New Directions, 1956.
- Flood, Merrill M. "So News." *Datamation* 30, no. 20 (1984): 15–16.
- . "Some Experimental Games." In *Research Memorandum RM-789*. Santa Monica, CA: RAND, 1952.
- . "The Traveling-Salesman Problem." *Operations Research* 4, no. 1 (1956): 61–75.
- . "What Future Is there for Intelligent Machines?" *Audio Visual Communication Review* 11, no. 6 (1963): 260–270.
- Forster, Edward M. *Howards End*. London: Edward Arnold, 1910.
- Fortnow, Lance. *The Golden Ticket: P, NP, and the Search for the Impossible*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2013.
- Fraker, Guy C. "The Real Lincoln Highway: The Forgotten Lincoln Circuit Markers." *Journal of the Abraham Lincoln Association* 25 (2004): 76–97.
- Frank, Robert H. "If Homo Economicus Could Choose His Own Utility Function, Would He Want One with a Conscience?" *American Economic Review* 1987, 593–604.
- . *Passions within Reason: The Strategic Role of the Emotions*. New York: Norton, 1988.
- Fredrickson, Barbara L., ve Laura L. Carstensen. "Choosing Social Partners: How Old Age and Anticipated Endings Make People More Selective." *Psychology and Aging* 5 (1990): 335–347.
- Freeman, P. R. "The Secretary Problem and Its Extensions: A Review." *International Statistical Review* 51 (1983): 189–206.
- Fung, Helene H., Laura L. Carstensen, ve Amy M. Lutz. "Influence of Time on Social Preferences: Implications for Life-Span Development." *Psychology and Aging* 14 (1999): 595–604.
- Gal, David, ve Blakeley B. McShane. "Can Small Victories Help Win the War? Evidence from Consumer Debt Management." *Journal of Marketing Research* 49 (2012): 487–501.
- Gallagher, P., ve C. Kerry. *Digital Signature Standard*. FIPS PUB 186-4, 2013.
- Garey, Michael R., ve David S. Johnson. *Computers and Intractability: A Guide to NP-Completeness*. New York: W. H. Freeman, 1979.
- Garfield, Eugene. "Recognizing the Role of Chance." *Scientist* 2, no. 8 (1988): 10.
- Garrett, A. J. M., ve P. Coles. "Bayesian Inductive Inference and the Anthropic Cosmological Principle." *Comments on Astrophysics*. 17 (1993): 23–47.
- Gasarch, William I. "The P =? NP Poll." *SIGACT News* 33, no. 2 (2002): 34–47.
- Gauthier, David P. *Morals by Agreement*. New York: Oxford University Press, 1985.
- Geman, Stuart, Elie Bienenstock, ve René Doursat. "Neural Networks and the Bias/Variance Dilemma." *Neural Computation* 4, no. 1 (1992): 1–58.
- Geoffryion, Arthur M. "Lagrangian Relaxation for Integer Programming." *Mathematical Programming Study* 2 (1974): 82–114.
- . "Lagrangian Relaxation for Integer Programming." In *50 Years of Integer*

- Programming 1958–2008: From Early Years to State of the Art. Edited by Michael Juenger, Thomas M. Liebling, Denis Naddef, George L. Nemhauser, William R. Pulleyblank, Gerhard Reinelt, Giovanni Rinaldi, ve Laurence A. Wolsey. Berlin: Springer, 2010, 243–281.
- Gigerenzer, Gerd, ve Henry Brighton. "Homo Heuristicus: Why Biased Minds Make Better Inferences." *Topics in Cognitive Science* 1, no. 1 (2009): 107–143.
- Gilbert, Daniel. *Stumbling on Happiness*. New York: Knopf, 2006.
- Gilbert, John P. ve Frederick Mosteller. "Recognizing the Maximum of a Sequence." *Journal of the American Statistical Association* 61 (1966): 35–75.
- Gilboa, Itzhak, ve Eitan Zemel. "Nash and Correlated Equilibria: Some Complexity Considerations." *Games and Economic Behavior* 1, no. 1 (1989): 80–93.
- Gillispie, Charles Coulston. *Pierre-Simon Laplace, 1749–1827: A Life in Exact Science*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2000.
- Gilmore, Paul C., ve Ralph E. Gomory. "A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem, Part II." *Operations Research* 11, no. 6 (1963): 863–888.
- Gilovich, Thomas. *How We Know What Isn't So*. New York: Simon & Schuster, 2008.
- Ginsberg, Allen. *Howl ve Other Poems*. San Francisco: City Lights Books, 1956.
- Gittins, John C. "Bandit Processes and Dynamic Allocation Indices." *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)* 41 (1979): 148–177.
- Gittins, John C., Kevin Glazebrook, ve Richard Weber. *Multi-Armed Bandit Allocation Indices*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2011.
- Gittins, John C., ve D. Jones. "A Dynamic Allocation Index for the Sequential Design of Experiments." In *Progress in Statistics*. Amsterdam: North Holland, 1974, 241–266.
- Glassner, Barry. "Narrative Techniques of Fear Mongering." *Social Research* 71 (2004): 819–826.
- Goldberg, Paul W., ve Christos H. Papadimitriou. "Reducibility Between Equilibrium Problems." *ACM Symposium on Theory of Computing* 2006, 62–70.
- Good, Irving John. *Good Thinking: The Foundations of Probability and Its Applications*. Minneapolis, MN: University of Minnesota Press, 1983.
- Gopnik, Alison, Andrew N. Meltzoff, ve Patricia K. Kuhl. *The Scientist in the Crib*. New York: Morrow, 1999.
- Gordon, Deborah M. "Control Without Hierarchy." *Nature* 446, no. 7132 (2007): 143.
- Gott, J. R. "Future Prospects Discussed." *Nature* 368 (1994): 108.
- . "Implications of the Copernican Principle for Our Future Prospects." *Nature* 363 (1993): 315–319.
- Gould, Stephen Jay. "The Median Isn't the Message." *Discover* 6, no. 6 (1985): 40–42.
- Graham, Ronald L., Eugene L. Lawler, Jan Karel Lenstra, ve Alexander H. G. Rinnooy Kan. "Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: A Survey." *Annals of Discrete Mathematics* 5 (1979): 287–326.
- Grenander, Ulf. "On Empirical Spectral Analysis of Stochastic Processes." *Arkiv för Matematik* 1, no. 6 (1952): 503–531.
- Gridgeman, T. "Geometric Probability and the Number π ." *Scripta Mathematica* 25, no. 3 (1960): 183–195.
- Griffiths, Thomas L., Charles Kemp, ve Joshua B. Tenenbaum. "Bayesian Models

- of Cognition." In the Cambridge Handbook of Computational Cognitive Modeling. Edited by Ron Sun. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.
- Griffiths, Thomas L., Falk Lieder, ve Noah D. Goodman. "Rational Use of Cognitive Resources: Levels of Analysis Between the Computational and the Algorithmic." *Topics in Cognitive Science* 7 (2015): 217–229.
- Griffiths, Thomas L., David M. Sobel, Joshua B. Tenenbaum, ve Alison Gopnik. "Bayes and Blickets: Effects of Knowledge on Causal Induction in Children and Adults." *Cognitive Science* 35 (2011): 1407–1455.
- Griffiths, Thomas L., Mark Steyvers, ve Alana Firl. "Google and the Mind: Predicting Fluency with PageRank." *Psychological Science* 18 (2007): 1069–1076.
- Griffiths, Thomas L., ve Joshua B. Tenenbaum. "Optimal Predictions in Everyday Cognition." *Psychological Science* 17 (2006): 767–773.
- Grossman, Dave, ve L. W. Christensen. *On Combat*. Belleville, IL: PPCT Research Publications, 2004.
- Haggstrom, Gus W. "Optimal Sequential Procedures When More an One Stop Is Required." *Annals of Mathematical Statistics* 38 (1967): 1618–1626.
- Hajaj, Chen, Noam Hazon, ve David Sarne. "Ordering Effects and Belief Adjustment in the Use of Comparison Shopping Agents." In *Proceedings of the Twenty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2014)*, 930–936.
- Halevy, Alon, Peter Norvig, ve Fernando Pereira. "The Unreasonable Effectiveness of Data." *Intelligent Systems, IEEE* 24, no. 2 (2009): 8–12.
- Hardin, Garrett. "The Tragedy of the Commons." *Science* 162, no. 3859 (1968): 1243–1248. Hardy, G. H. *Collected Works*. Vol. II. Oxford, UK: Oxford University Press, 1967.
- . "Prime Numbers." *British Association Report* 10 (1915): 350–354.
- Harmenberg, J. *Epee 2.0: The Birth of the New Fencing Paradigm*. New York: SKA Swordplay Books, 2007.
- Harsanyi, John C. "Can the Maximin Principle Serve as a Basis for Morality? A Critique of John Rawls's Theory." *the American Political Science Review* 69, no. 2 (1975): 594–606.
- Harvey, Jerry B. "The Abilene Paradox: The Management of Agreement." *Organizational Dynamics* 3, no. 1 (1974): 63–80.
- Hastings, W. K. "Monte Carlo Methods Using Markov Chains and Their Applications." *Biometrika* 57 (1970): 97–109.
- Hawken, Angela, ve Mark Kleiman. *Managing Drug Involved Probationers with Swi and Certain Sanctions: Evaluating Hawaii's HOPE*. Report submitted to the National Institute of Justice. 2009. <http://www.ncjrs.gov/pd/les1/nij/grants/229023.pdf>.
- Held, Michael, ve Richard M. Karp. "The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees." *Operations Research* 18, no. 6 (1970): 1138–1162.
- . "The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees: Part II." *Mathematical Programming* 1, no. 1 (1971): 6–25.
- Henderson, T. *Discrete Relaxation Techniques*. Oxford, UK: Oxford University Press, 1989.
- Hennessy, John L., ve David A. Patterson. *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. New York: Elsevier, 2012.
- Herrmann, Jeffrey W. "The Perspectives of Taylor, Gantt, and Johnson: How to Improve Production Scheduling." *International Journal of Operations and Quality Management* 16 (2010): 243–254.

- Heyde, C. C. "Agner Krarup Erlang." In *Statisticians of the Centuries*. Edited by C. C.
- Heyde, E. Seneta, P. Crepel, S. E. Fienberg, ve J. Gani, 328–330. New York: Springer, 2001.
- Hill, Theodore. "Knowing When to Stop." *American Scientist* 97 (2009): 126–131.
- Hillis, W. Daniel. *The Pattern on the Stone: The Simple Ideas at Make Computers Work*. New York: Basic Books, 1998.
- Hirshleifer, Jack. "On the Emotions as Guarantors of Reats and Promises." In *The Latest on the Best: Essays in Evolution and Optimality*. Edited by John Dupre, 307–326. Cambridge, MA: MIT Press, 1987.
- Hoffman, David. *The Oligarchs: Wealth and Power in the New Russia*. New York: Public-Affairs, 2003.
- Horvitz, Eric, ve Shlomo Zilberstein. "Computational Tradeoffs Under Bounded Resources." *Artificial Intelligence* 126 (2001): 1–4.
- Hosken, James C. "Evaluation of Sorting Methods." In *Papers and Discussions Presented at the November 7–9, 1955, Eastern Joint AIEE-IRE Computer Conference: Computers in Business and Industrial Systems*, 39–55.
- Hurd, Cuthbert C. "A Note on Early Monte Carlo Computations and Scientific Meetings." *IEEE Annals of the History of Computing* 7, no. 2 (1985): 141–155.
- Impagliazzo, Russell, ve Avi Wigderson. "P=BPP if E Requires Exponential Circuits: Derandomizing the XOR Lemma." In *Proceedings of the Twenty-Ninth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 1997, 220–229.
- . "Randomness vs. Time: De-Randomization Under a Uniform Assumption." In *Proceedings of the 39th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 1998, 734–743.
- Ingram, Wendy Marie, LEEANNE M. Goodrich, Ellen A. Robey, ve Michael B. Eisen. "Mice Infected with Low-Virulence Strains of *Toxoplasma Gondii* Lose their Innate Aversion to Cat Urine, Even After Extensive Parasite Clearance." *PLOS ONE*, no. 9 (2013): e75246.
- Jackson, James R. *Scheduling a Production Line to Minimize Maximum Tardiness*. Technical report 43. Management Science Research Project, University of California, Los Angeles, 1955.
- Jacobson, Van. "Congestion Avoidance and Control." In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 18, no. 4 (1988): 314–329.
- . "A New Way to Look at Networking." Lecture at Google, Mountain View, CA, August 2006. <https://www.youtube.com/watch?v=oCZMoY3q2uM>.
- James, William. "Great Men, Great Thoughts, and the Environment." *Atlantic Monthly* 46 (1880): 441–459.
- . *Psychology: Briefer Course*. New York: Holt, 1892.
- Jay, Francine. *The Joy of Less: A Minimalist Living Guide: How to Declutter, Organize, and Simplify Your Life*. Medford, NJ: Anja Press, 2010.
- Jeffreys, Harold. "An Invariant Form for the Prior Probability in Estimation Problems." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 186 (1946): 453–461.
- . *Theory of Probability*, 3rd ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 1961.
- Johnson, Selmer Martin. "Optimal Two- and three-Stage Production Schedules with Setup Times Included." *Naval Research Logistics Quarterly* 1, no. 1 (1954): 61–68.
- Johnson, Theodore, ve Dennis Shasha. "2Q: A Low Overhead High Performance Buffer Management Replacement Algorithm." *Vldb'94 Proceedings of the*

- 20th International Conference on Very Large Data Bases, 1994, 439–450.
- Jones, Thomas B., ve David H. Ackley. "Comparison Criticality in Sorting Algorithms." In 2014 44th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), June 2014, 726–731.
- Jones, William. *Keeping Found Things Found: The Study and Practice of Personal Information Management*. Burlington, MA: Morgan Kaufmann, 2007.
- Kaelbling, Leslie Pack. *Learning in Embedded Systems*. Cambridge, MA: MIT Press, 1993.
- Kaelbling, Leslie Pack, Michael L. Littman, ve Andrew W. Moore. "Reinforcement Learning: A Survey." *Journal of Artificial Intelligence Research* 4 (1996): 237–285.
- Kanigel, Robert. *The One Best Way: Frederick Winslow Taylor and the Enigma of Efficiency*. New York: Viking Penguin, 1997.
- Kant, Immanuel. *Grundlegung zur Metaphysik der Sitten*. Riga: Johann Friedrich Hartknoch, 1785.
- . *Kritik der praktischen Vernunft*. Riga: Johann Friedrich Hartknoch, 1788.
- Karmarkar, Narendra. "A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming." In *Proceedings of the Sixteenth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 1984, 302–311.
- Karp, Richard M. "An Introduction to Randomized Algorithms." *Discrete Applied Mathematics* 34, no. 1 (1991): 165–201.
- . "Reducibility Among Combinatorial Problems." In *Complexity of Computer Computations*, 85–103. New York: Plenum, 1972.
- Katajainen, Jyrki, ve Jesper Larsson Trä. "A Meticulous Analysis of Mergesort Programs." In *Algorithms and Complexity: Third Italian Conference CIAC'97*. Berlin: Springer, 1997.
- Katehakis, Michael N., ve Herbert Robbins. "Sequential Choice from Several Populations." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 92 (1995): 8584–8585.
- Kelly, F. P. "Multi-Armed Bandits with Discount Factor Near One: the Bernoulli Case." *Annals of Statistics* 9 (1981): 987–1001.
- Kelly, John L. "A New Interpretation of Information Rate." *Information Theory, IRE Transactions on* 2, no. 3 (1956): 185–189.
- Khachiyan, Leonid G. "Polynomial Algorithms in Linear Programming." *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics* 20, no. 1 (1980): 53–72.
- Khot, Subhash, ve Oded Regev. "Vertex Cover Might Be Hard to Approximate to Within $2-\epsilon$." *Journal of Computer and System Sciences* 74, no. 3 (2008): 335–349.
- Kidd, Celeste, Holly Palmeri, ve Richard N. Aslin. "Rational Snacking: Young Children's Decision-Making on the Marshmallow Task Is Moderated by Beliefs About Environmental Reliability." *Cognition* 126, no. 1 (2013): 109–114.
- Kilburn, Tom, David B. G. Edwards, M. J. Lanigan, ve Frank H. Sumner. "One-Level Storage System." *IRE Transactions on Electronic Computers* (1962): 223–235.
- Kinsbourne, Marcel. "Somatic Twist: A Model for the Evolution of Decussation." *Neuropsychology* 27, no. 5 (2013): 511.
- Kirby, Kris N. "Bidding on the Future: Evidence Against Normative Discounting of Delayed Rewards." *Journal of Experimental Psychology: General* 126, no. 1 (1997): 54–70.
- Kirkpatrick, Scott, C. D. Gelatt, ve M. P. Vecchi. "Optimization by Simulated Annealing." *Science* 220, no. 4598 (1983): 671–680.

- Knuth, Donald E. "Ancient Babylonian Algorithms." *Communications of the ACM* 15, no. 7 (1972): 671–677.
- . *The Art of Computer Programming, Volume 1: Fundamental Algorithms*. 3rd ed. Boston: Addison-Wesley, 1997.
- . *The Art of Computer Programming, Volume 3: Sorting and Searching*, 3rd ed. Boston: Addison-Wesley, 1997.
- . "A Terminological Proposal." *ACM SIGACT News* 6, no. 1 (1974): 12–18.
- . "e TeX Tuneup of 2014." *TUGboat* 35, no. 1 (2014).
- . *Things a Computer Scientist Rarely Talks About*. Stanford, CA: Center for the Study of Language/Information, 2001.
- . "Von Neumann's First Computer Program." *ACM Computing Surveys (CSUR)* 2, no. 4 (December 1970): 247–260.
- Koestler, Arthur. *The Watershed: A Biography of Johannes Kepler*. Garden City, NY: Doubleday, 1960.
- Kozen, Dexter, ve Shmuel Zaks. "Optimal Bounds for the Change-Making Problem." In *Automata, Languages and Programming*, 700: 150–161. Edited by Andrzej Lingas, Rolf Karlsson, and Svante Carlsson. Berlin: Springer, 1993.
- Lai, Tze Leung, ve Herbert Robbins. "Asymptotically Efficient Adaptive Allocation Rules." *Advances in Applied Mathematics* 6 (1985): 4–22.
- Lamport, Leslie, Robert Shostak, ve Marshall Pease. "The Byzantine Generals Problem." *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)* 4, no. 3 (1982): 382–401.
- Laplace, Pierre-Simon. *A Philosophical Essay on Probabilities*. 1812. Reprint, New York: Dover, 1951.
- . "Memoir on the Probability of the Causes of Events." *Statistical Science* 1 (1774/1986): 364–378.
- . *Théorie analytique des probabilités*. Paris: Mme Ve Courcier, 1812.
- Lawler, Eugene L. "Old Stories." In *History of Mathematical Programming. A Collection of Personal Reminiscences*, 97–106. Amsterdam: CWI/North-Holland, 1991.
- . "Optimal Sequencing of a Single Machine Subject to Precedence Constraints." *Management Science* 19, no. 5 (1973): 544–546.
- . *Scheduling a Single Machine to Minimize the Number of Late Jobs*. Technical report. Berkeley: University of California, 1983.
- . "Scheduling a Single Machine to Minimize the Number of Late Jobs," no. UCB/ CSD-83-139 (1983). <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/1983/6344.html>.
- . "Sequencing Jobs to Minimize Total Weighted Completion Time Subject to Precedence Constraints." *Annals of Discrete Mathematics* 2 (1978): 75–90.
- Lawler, Eugene L., Jan Karel Lenstra, ve Alexander H. G. Rinnooy Kan. "A Gift for Alexander!: At Play in the Fields of Scheduling Theory." *Optima* 7 (1982): 1–3.
- Lawler, Eugene L., Jan Karel Lenstra, Alexander H. G. Rinnooy Kan, ve David B. Shmoys. "Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity." In *Handbooks in Operations Research and Management Science, Volume 4: Logistics of Production and Inventory*, edited by S. S. Graves, A. H. G. Rinnooy Kan, and P. Zipkin, 445–522. Amsterdam: North Holland, 1993.
- . *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. New York: Wiley, 1985.
- Lazzarini, Mario. "Un'applicazione del calcolo della probabilità alla ricerca sperimentale di un valore approssimato di π ." *Periodico di Matematica* 4 (1901): 140–143.

- Lee, Donghee, S. H. Noh, S. L. Min, J. Choi, J. H. Kim, Yookun Cho, ve Chong Sang Kim. "LRFU: A Spectrum of Policies at Subsumes the Least Recently Used and Least Frequently Used Policies." *IEEE Transactions on Computers* 50 (2001): 1352–1361.
- Le Guin, Ursula K. "the Ones Who Walk Away from Omelas." In *New Dimensions 3*. Edited by Robert Silverberg. New York: Signet, 1973.
- Lenstra, Jan Karel. "e Mystical Power of Twoness: In Memoriam Eugene L. Lawler." *Journal of Scheduling* 1, no. 1 (1998): 3–14.
- Lenstra, Jan Karel, Alexander H. G. Rinnooy Kan, ve Peter Brucker. "Complexity of Machine Scheduling Problems." *Annals of Discrete Mathematics* 1 (1977): 343–362.
- Lerner, Ben. *The Lichtenberg Figures*. Port Townsend, WA: Copper Canyon Press, 2004.
- Lindley, Denis V. "Dynamic Programming and Decision eory." *Applied Statistics* 10 (1961): 39–51.
- Lippman, Steven A., ve John J. McCall. "The Economics of Job Search: A Survey." *Economic Inquiry* 14 (1976): 155–189.
- Lorie, James H., ve Leonard J. Savage. "Three Problems in Rationing Capital." *Journal of Business* 28, no. 4 (1955): 229–239.
- Lowe, Christopher J., Mark Terasaki, Michael Wu, Robert M. Freeman Jr., Linda Run , Kristen Kwan, Saori Haigo, Jochanan Aronowicz, Eric Lander, Chris Gruber, ve diğeri, "Dorso-ventral Patterning in Hemichordates: Insights into Early Chordate Evolution." *PLoS Biology* 4, no. 9 (2006): e291.
- Lucas, Richard E., Andrew E. Clark, Yannis Georgellis, ve Ed Diener. "Reexamining Adaptation and the Set Point Model of Happiness: Reactions to Changes in Marital Status." *Journal of Personality and Social Psychology* 84, no. 3 (2003): 527–539.
- Lueker, George S. "Two NP-Complete Problems in Nonnegative Integer Programming." Technical Report TR-178, Computer Science Laboratory, Princeton University, 1975.
- Luria, Salvador E. *A Slot Machine, a Broken Test Tube: An Autobiography*. New York: Harper & Row, 1984.
- MacQueen, J., ve R. G. Miller. "Optimal Persistence Policies." *Operations Research* 8 (1960): 362–380.
- Malthus, Thomas Robert. *An Essay on the Principle of Population*. London: J. Johnson, 1798.
- Marcus, Gary. Kluge: *The Haphazard Evolution of the Human Mind*. New York: Houghton Mi in Harcourt, 2009.
- Markowitz, Harry. "Portfolio Selection." *Journal of Finance* 7, no. 1 (1952): 77–91.
- . *Portfolio Selection: Efficient Diversi cation of Investments*. New York: Wiley, 1959.
- Martin, Thomas Commerford. "Counting a Nation by Electricity." *Electrical Engineer* 12, no. 184 (1891): 521–530.
- McCall, John. "Economics of Information and Job Search." *Quarterly Journal of Economics* 84 (1970): 113–126.
- McGrayne, Sharon Bertsch. *The Theory at Would Not Die: How Bayes' Rule Cracked the Enigma Code, Hunted Down Russian Submarines, & Emerged Triumphant from Two Centuries of Controversy*. New Haven, CT: Yale University Press, 2011.
- McGuire, Joseph T., ve Joseph W. Kable. "Decision Makers Calibrate Behavioral Persistence on the Basis of Time-Interval Experience." *Cognition* 124, no. 2 (2012): 216–226.
- . "Rational Temporal Predictions Can Underlie Apparent Failures to Delay

- Gratification." *Psychological Review* 120, no. 2 (2013): 395.
- Megiddo, Nimrod, ve Dharmendra S. Modha. "Outperforming LRU with an Adaptive Replacement Cache Algorithm." *Computer* 37, no. 4 (2004): 58–65.
- Mellen, Andrew. *Unstu Your Life! Kick the Clutter Habit and Completely Organize Your Life for Good*. New York: Avery, 2010.
- Menezes, Alfred J., Paul C. Van Oorschot, ve Scott A Vanstone. *Handbook of Applied Cryptography*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1996.
- Menger, Karl. "Das botenproblem." *Ergebnisse eines mathematischen kolloquiums* 2 (1932): 11–12.
- Metropolis, Nicholas, Arianna W. Rosenbluth, Marshall N. Rosenbluth, Augusta H. Teller, ve Edward Teller. "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines." *Journal of Chemical Physics* 21, no. 6 (1953): 1087–1092.
- Meyer, Robert J., ve Yong Shi. "Sequential Choice Under Ambiguity: Intuitive Solutions to the Armed-Bandit Problem." *Management Science* 41 (1995): 817–834.
- Millard-Ball, Adam, Rachel R. Weinberger, ve Robert C. Hampshire. "Is the Curb 80% Full or 20% Empty? Assessing the Impacts of San Francisco's Parking Pricing Experiment." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 63 (2014): 76–92.
- Mischel, Walter, Ebbe B. Ebbesen, ve Antonette Rasko Zeiss. "Cognitive and Attentional Mechanisms in Delay of Gratification." *Journal of Personality and Social Psychology* 21, no. 2 (1972): 204.
- Mischel, Walter, Yuichi Shoda, ve Monica I. Rodriguez. "Delay of Gratification in Children." *Science* 244, no. 4907 (1989): 933–938.
- Mitzenmacher, Michael, ve Eli Upfal. *Probability and Computing: Randomized Algorithms and Probabilistic Analysis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- Monsell, Stephen. "Task Switching." *Trends in Cognitive Sciences* 7, no. 3 (2003): 134–140.
- Moore, Gordon E. "Cramming More Components onto Integrated Circuits." *Electronics Magazine* 38 (1965): 114–117.
- . "Progress in Digital Integrated Electronics." In *International Electronic Devices Meeting 1975 Technical Digest*, 1975, 11–13.
- Moore, J. Michael. "An N Job, One Machine Sequencing Algorithm for Minimizing the Number of Late Jobs." *Management Science* 15, no. 1 (1968): 102–109.
- Morgenstern, Julie. *Organizing from the Inside Out: The Foolproof System for Organizing Your Home, Your Office and Your Life*. New York: Macmillan, 2004.
- Moser, L. "On a Problem of Cayley." *Scripta Mathematica* 22 (1956): 289–292.
- Motwani, Rajeev, and Prabhakar Raghavan. *Randomized Algorithms*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.
- . "Randomized Algorithms." *ACM Computing Surveys (CSUR)* 28, no. 1 (1996): 33–37.
- Mucci, A. G. "On a Class of Secretary Problems." *Annals of Probability* 1 (1973): 417–427.
- Murray, David. *Chapters in the History of Bookkeeping, Accountancy and Commercial Arithmetic*. Glasgow, UK: Jackson, Wylie, 1930.
- Myerson, Roger B. "Nash Equilibrium and the History of Economic eory." *Journal of Economic Literature* 1999, 1067–1082.
- . "Optimal Auction Design." *Mathematics of Operations Research* 6, no. 1 (1981): 58–73.

- Nash, John F. "Equilibrium Points in N-Person Games." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 36, no. 1 (1950): 48–49.
- . "Non-Cooperative Games." *Annals of Mathematics* 54, no. 2 (1951): 286–295.
- . "The Bargaining Problem." *Econometrica* 18, no. 2 (1950): 155–162.
- Navarro, Daniel J., ve Ben R. Newell. "Information Versus Reward in a Changing World." In *Proceedings of the 36th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 2014, 1054–1059.
- Neumann, John von, ve Oskar Morgenstern. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1944.
- Neyman, Jerzy. "Outline of a Theory of Statistical Estimation Based on the Classical Theory of Probability." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 236, no. 767 (1937): 333–380.
- Nichols, Kathleen, ve Van Jacobson. "Controlling Queue Delay: A Modern AQM Is Just One Piece of the Solution to Bufferbloat." *ACM Queue Networks* 10, no. 5 (2012): 20–34.
- Nisan, Noam, ve Amir Ronen. "Algorithmic Mechanism Design." In *Proceedings of the Thirty-First Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 1999, 129–140.
- Olshausen, Bruno A., and David J. Field. "Emergence of Simple-Cell Receptive Field Properties by Learning a Sparse Code for Natural Images." *Nature* 381 (1996): 607–609.
- O'Neil, Elizabeth J., Patrick E. O'Neil, ve Gerhard Weikum. "The LRU-K Page Replacement Algorithm for Database Disk Buffering." *ACM SIGMOD Record* 22, no. 2 (1993): 297–306.
- Papadimitriou, Christos. "Foreword." In *Algorithmic Game Theory*. Edited by Noam Nisan, Tim Roughgarden, Éva Tardos, and Vijay V. Vazirani. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- Papadimitriou, Christos H., ve John N. Tsitsiklis. "The Complexity of Optimal Queuing Network Control." *Mathematics of Operations Research* 24 (1999): 293–305.
- Papadimitriou, Christos H., ve Mihalis Yannakakis. "On Complexity as Bounded Rationality." In *Proceedings of the Twenty-Sixth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 1994, 726–733.
- Pardalos, Panos M., ve Georg Schnitger. "Checking Local Optimality in Constrained Quadratic Programming is NP-hard." *Operations Research Letters* 7 (1988): 33–35.
- Pareto, Vilfredo. *Cours d'économie politique*. Lausanne: F. Rouge, 1896.
- Part, Derek. *Reasons and Persons*. Oxford, UK: Oxford University Press, 1984.
- Partnoy, Frank. *Wait: The Art and Science of Delay*. New York: PublicAffairs, 2012.
- Pascal, Blaise. *Pensées sur la religion et sur quelques autres sujets*. Paris: Guillaume Desprez, 1670.
- Peter, Laurence J., ve Raymond Hull. *The Peter Principle: Why Things Always Go Wrong*. New York: Morrow, 1969.
- Petrucelli, Joseph D. "Best-Choice Problems Involving Uncertainty of Selection and Recall of Observations." *Journal of Applied Probability* 18 (1981): 415–425.
- Pettie, Seth, ve Vijaya Ramachandran. "An Optimal Minimum Spanning Tree Algorithm." *Journal of the ACM* 49, no. 1 (2002): 16–34.
- Pinedo, Michael. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. New York:

- Springer, 2012.
- . "Stochastic Scheduling with Release Dates and Due Dates." *Operations Research* 31, no. 3 (1983): 559–572.
- Pirsig, Robert M. *Zen ve the Art of Motorcycle Maintenance*. New York: Morrow, 1974.
- Poundstone, William. *Fortune's Formula: The Untold Story of the Scientific Betting System at Beat the Casinos and Wall Street*. New York: Macmillan, 2005.
- . *Prisoner's Dilemma: John von Neumann, Game eory, and the Puzzle of the Bomb*. New York: Doubleday, 1992.
- Prabhakar, Balaji, Katherine N. Dektar, ve Deborah M. Gordon. "The Regulation of Ant Colony Foraging Activity Without Spatial Information." *PLoS Computational Biology* 8, no. 8 (2012): e1002670.
- Presman, Ernst L'vovich, ve Isaac Mikhailovich Sonin. "The Best Choice Problem for a Random Number of Objects."
- Teoriya Veroyatnostei Primeneniya 17 (1972): 695–706. Production and Operations Management Society. "James R. Jackson." *Production and Operations Management* 17, no. 6 (2008): i–ii.
- Rabin, Michael O. "Probabilistic Algorithm for Testing Primality." *Journal of Number Theory* 12, no. 1 (1980): 128–138.
- Rabin, Michael O., ve Dana Scott. "Finite Automata and their Decision Problems." *IBM Journal of Research and Development* 3 (1959): 114–125.
- Raichle, Marcus E., ve Debra A. Gusnard. "Appraising the Brain's Energy Budget." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, no. 16 (2002): 10237–10239.
- Ramakrishnan, Kadangode, ve Sally Floyd. A Proposal to Add Explicit Congestion Notification (ECN) to IP. Technical report. RFC 2481, January 1999.
- Ramakrishnan, Kadangode, Sally Floyd, ve David Black. The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP. Technical report. RFC 3168, Eylül 2001.
- Ramscar, Michael, Peter Hendrix, Cyrus Shaoul, Petar Milin, ve Harald Baayen. "The Myth of Cognitive Decline: Non-Linear Dynamics of Lifelong Learning." *Topics in Cognitive Science* 6, no. 1 (2014): 5–42.
- Rasmussen, Willis T., ve Stanley R. Pliska. "Choosing the Maximum from a Sequence with a Discount Function." *Applied Mathematics and Optimization* 2 (1975): 279–289.
- Rawls, John. *A Theory of Justice*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.
- Revusky, Samuel H., ve Erwin W. Bedarf. "Association of Illness with Prior Ingestion of Novel Foods." *Science* 155, no. 3759 (1967): 219–220.
- Reynolds, Andy M. "Signatures of Active and Passive Optimized Lévy Searching in Jelly fish." *Journal of the Royal Society Interface* 11, no. 99 (2014): 20140665.
- Ridgway, Valentine F. "Dysfunctional Consequences of Performance Measurements." *Administrative Science Quarterly* 1, no. 2 (1956): 240–247.
- Riley, John G., ve William F. Samuelson. "Optimal Auctions." *American Economic Review* 71, no. 3 (1981): 381–392.
- Rittaud, Benoît, ve Albrecht Heeffer. "The Pigeonhole Principle, Two Centuries Before Dirichlet." *Mathematical Intelligencer* 36, no. 2 (2014): 27–29.
- Rivest, Ronald L., Adi Shamir, ve Leonard Adleman. "A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems." *Communications of the ACM* 21, no. 2 (1978): 120–126.

- Robbins, Herbert. "Some Aspects of the Sequential Design of Experiments." *Bulletin of the American Mathematical Society* 58 (1952): 527–535.
- Robinson, Julia. On the Hamiltonian Game (a Traveling Salesman Problem). Technical report RAND/RM-303. Santa Monica, CA: RAND, 1949.
- Rogerson, Richard, Robert Shimer, ve Randall Wright. Search-theoretic Models of the Labor Market: A Survey. Technical report. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 2004.
- Rose, John S. "A Problem of Optimal Choice and Assignment." *Operations Research* 30 (1982): 172–181.
- Rosenbaum, David A., Lanyun Gong, ve Cory Adam Potts. "Pre-Crastination: Hastening Subgoal Completion at the Expense of Extra Physical Effort." *Psychological Science* 25, no. 7 (2014): 1487–1496.
- Rosenbluth, Marshall. Marshall Rosenbluth, interviewed by Kai-Henrik Barth. August 11, 2003, College Park, MD.
- Rostker, Bernard D., Harry J., James L. Lacy, Jennifer H. Kawata, ve Susanna W. Purnell. The Defense Officer Personnel Management Act of 1980: A Retrospective Assessment. Santa Monica, CA: RAND, 1993.
- Roughgarden, Tim, ve Éva Tardos. "How Bad Is Selfish Routing?" *Journal of the ACM* 49, no. 2 (2002): 236–259.
- Russell, Bertrand. "The Elements of Ethics." In *Philosophical Essays*, 13–59. London: Longmans, Green, 1910.
- Russell, Stuart, ve Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2009.
- Russell, Stuart, ve Eric Wefald. *Do the Right Thing*. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.
- Sagan, Carl. *Broca's Brain: Reflections on the Romance of Science*. New York: Random House, 1979.
- Sakaguchi, Minoru. "Bilateral Sequential Games Related to the No-Information Secretary Problem." *Mathematica Japonica* 29 (1984): 961–974.
- . "Dynamic Programming of Some Sequential Sampling Design." *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 2 (1961): 446–466.
- Sakaguchi, Minoru, ve Mitsushi Tamaki. "On the Optimal Parking Problem in Which Spaces Appear Randomly." *Bulletin of Informatics and Cybernetics* 20 (1982): 1–10.
- Sartre, Jean-Paul. *No Exit: A Play in One Act*. New York: Samuel French, 1958.
- Schelling, Thomas C. "Altruism, Meanness, and Other Potentially Strategic Behaviors." *American Economic Review* 68, no. 2 (1978): 229–230.
- . *The Strategy of Conflict*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1960.
- Schneier, Bruce. *Applied Cryptography*. New York: Wiley, 1994.
- Schrage, Linus. "A Proof of the Optimality of the Shortest Remaining Processing Time Discipline." *Operations Research* 16, no. 3 (1968): 687–690.
- Schrijver, Alexander. "On the History of Combinatorial Optimization (Till 1960)." In *Handbooks in Operations Research and Management Science: Discrete Optimization*. Edited by Karen Aardal, George L. Nemhauser, and Robert Weismantel. Amsterdam: Elsevier, 2005, 1–68.
- Schwartz, Jacob T. "Fast Probabilistic Algorithms for Verification of Polynomial Identities." *Journal of the ACM* 27, no. 4 (1980): 701–717.
- Seale, Darryl A., ve Amnon Rapoport. "Sequential Decision Making with Relative Ranks: An Experimental Investigation of the 'Secretary Problem.'" *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 69 (1997): 221–236.
- Sen, Amartya. "Goals, Commitment, and Identity." *Journal of Law, Economics, and Organization* 1 (1985): 341–355.
- Sethi, Rajiv. "Algorithmic Trading and Price Volatility." Rajiv Sethi (blog), 7

- Mayis 2010, [http:// rajivsethi.blogspot.com/2010/05/algorithmic-trading-and-price.html](http://rajivsethi.blogspot.com/2010/05/algorithmic-trading-and-price.html).
- Sevcik, Kenneth C. "Scheduling for Minimum Total Loss Using Service Time Distributions." *Journal of the ACM* 21, no. 1 (1974): 66–75.
- Shallit, Jeffrey. "What is Country Needs Is an 18¢ Piece." *Mathematical Intelligencer* 25, no. 2 (2003): 20–23.
- Shasha, Dennis, ve Cathy Lazere. *Out of their Minds: The Lives and Discoveries of 15 Great Computer Scientists*. New York: Springer, 1998.
- Shasha, Dennis, ve Michael Rabin. "An Interview with Michael Rabin." *Communications of the ACM* 53, no. 2 (2010): 37–42.
- Shaw, Frederick S. *An Introduction to Relaxation Methods*. New York: Dover, 1953.
- Shaw, George Bernard. *Man and Superman: A Comedy and a Philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1903.
- Shoup, Donald. *The High Cost of Free Parking*. Chicago: APA Planners Press, 2005.
- Simon, Herbert A. "A Behavioral Model of Rational Choice." *Quarterly Journal of Economics* 69, no. 1 (1955): 99–118.
- . *Models of Man*. New York: Wiley, 1957.
- . "On a Class of Skew Distribution Functions." *Biometrika*, 1955, 425–440.
- Siroker, Dan. "How Obama Raised \$60 Million by Running a Simple Experiment." *The Optimizely Blog: A/B Testing You'll Actually Use* (blog), 29 Kasım 2010, <https://blog.optimizely.com/2010/11/29/how-obama-raised-60-million-by-running-a-simple-experiment/>.
- Siroker, Dan, ve Pete Koomen. *A/B Testing: The Most Powerful Way to Turn Clicks into Customers*. New York: Wiley, 2013.
- Sleator, Daniel D., ve Robert E. Tarjan. "Amortized Efficiency of List Update and Paging Rules." *Communications of the ACM* 28 (1985): 202–208.
- Smith, Adam. *The Theory of Moral Sentiments*. Printed for A. Millar, in the Strand; and A. Kincaid and J. Bell, in Edinburgh, 1759.
- Smith, M. H. "A Secretary Problem with Uncertain Employment." *Journal of Applied Probability* 12, no. 3 (1975): 620–624.
- Smith, Wayne E. "Various Optimizers for Single-Stage Production." *Naval Research Logistics Quarterly* 3, nos. 1–2 (1956): 59–66.
- Solovay, Robert, ve Volker Strassen. "A Fast Monte-Carlo Test for Primality." *SIAM Journal on Computing* 6 (1977): 84–85.
- Starr, Norman. "How to Win a War if You Must: Optimal Stopping Based on Success Runs." *Annals of Mathematical Statistics* 43, no. 6 (1972): 1884–1893.
- Stephens, David W., ve John R. Krebs. *Foraging Theory*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1986.
- Stewart, Martha. *Martha Stewart's Homekeeping Handbook: The Essential Guide to Caring for Everything in Your Home*. New York: Clarkson Potter, 2006.
- Stewart, Theodor J. "Optimal Selection from a Random Sequence with Learning of the Underlying Distribution." *Journal of the American Statistical Association* 73, no. 364 (1978): 775–780.
- Steyvers, Mark, Michael D. Lee, ve Eric-Jan Wagenmakers. "A Bayesian Analysis of Human Decision-Making on Bandit Problems." *Journal of Mathematical Psychology* 53 (2009): 168–179.
- Stigler, George J. "The Economics of Information." *Journal of Political Economy* 69 (1961): 213–225.
- . "Information in the Labor Market." *Journal of Political Economy* 70

- (1962): 94–105.
- Stigler, Stephen M. “Stigler’s Law of Eponymy.” *Transactions of the New York Academy of Sciences* 39 (1980): 147–157.
- Tamaki, Mitsushi. “Adaptive Approach to Some Stopping Problems.” *Journal of Applied Probability* 22 (1985): 644–652.
- . “An Optimal Parking Problem.” *Journal of Applied Probability* 19 (1982): 803–814.
- . “Optimal Stopping in the Parking Problem with U-Turn.” *Journal of Applied Probability* 25 (1988): 363–374.
- Thomas, Helen. *Front Row at the White House: My Life and Times*. New York: Simon & Schuster, 2000.
- Thompson, William R. “On the Likelihood at One Unknown Probability Exceeds Another in View of the Evidence of Two Samples.” *Biometrika* 25 (1933): 285–294.
- Thoreau, Henry David. “Walking.” *Atlantic Monthly* 9 (1862): 657–674.
- Tibshirani, Robert. “Regression Shrinkage and Selection via the Lasso.” *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 58, no. 1 (1996): 267–288.
- Tikhonov, A. N., ve V. Y. Arsenin. *Solution of Ill-Posed Problems*. Washington, DC: Winston, 1977.
- Todd, Peter M. “Coevolved Cognitive Mechanisms in Mate Search.” *Evolution and the Social Mind: Evolutionary Psychology and Social Cognition* (New York) 9 (2007): 145–159.
- Todd, Peter M., ve G. F. Miller. “From Pride and Prejudice to Persuasion: Satisficing in Mate Search.” In *Simple Heuristics at Make Us Smart*. Edited by G. Gigerenzer and P. M. Todd. New York: Oxford University Press, 1999, 287–308.
- Tolins, Jackson, ve Jean E. Fox Tree. “Addressee Backchannels Steer Narrative Development.” *Journal of Pragmatics* 70 (2014): 152–164.
- Tracy, Brian. *Eat at Frog! 21 Great Ways to Stop Procrastinating and Get More Done in Less Time*. Oakland, CA: Berrett-Koehler, 2007.
- Turing, Alan M. “On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem.” *Bakınız* 12 Kasım 1936. *Proceedings of the London Mathematical Society* s2-42, no. 1 (1937): 230–265.
- . “On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem: A Correction.” *Proceedings of the London Mathematical Society* s2-43, no. 1 (1938): 544–546.
- Tversky, Amos, ve Ward Edwards. “Information Versus Reward in Binary Choices.” *Journal of Experimental Psychology* 71 (1966): 680–683.
- Ulam, Stanislaw M. *Adventures of a Mathematician*. New York: Scribner, 1976.
- Ullman, Ellen. “Out of Time: Reflections on the Programming Life.” *Educom Review* 31 (1996): 53–59.
- UK Collaborative ECMO Group. “The Collaborative UK ECMO Trial: Follow-up to 1 Year of Age.” *Pediatrics* 101, no. 4 (1998): e1.
- Vazirani, Vijay V. *Approximation Algorithms*. New York: Springer, 2001.
- Vickrey, William. “Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders.” *Journal of Finance* 16, no. 1 (1961): 8–37.
- Waitzman, David. *A Standard for the Transmission of IP Datagrams on Avian Carriers*. Technical report. RFC 1149, April 1990.
- . *IP Over Avian Carriers with Quality of Service*. Technical report. RFC 2549, Nisan 1999.
- Ware, James H. “Investigating Therapies of Potentially Great Benefit: ECMO.”

- Statistical Science 4 (1989): 298–306.
- Ware, James H., ve Michael F. Epstein. "Comments on 'Extracorporeal Circulation in Neonatal Respiratory Failure: A Prospective Randomized Study' by R. H. Bartlett et al." *Pediatrics* 76, no. 5 (1985): 849–851.
- Warhol, Andy. *The Philosophy of Andy Warhol (from A to B and Back Again)*. New York: Harcourt Brace Jovanovich, 1975.
- Weiss, Yair, Eero P. Simoncelli, ve Edward H. Adelson. "Motion Illusions as Optimal Percepts." *Nature Neuroscience* 5 (2002): 598–604.
- Whittaker, Steve, ve Candace Sidner. "Email Overload: Exploring Personal Information Management of Email." In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1996, 276–283.
- Whittaker, Steve, Tara Matthews, Julian Cerruti, Hernan Badenes, ve John Tang. "Am I Wasting My Time Organizing Email? A Study of Email Re nding." In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2011, 3449–3458.
- Whittle, Peter. *Optimization over Time: Dynamic Programming and Stochastic Control*. New York: Wiley, 1982.
- . "Restless Bandits: Activity Allocation in a Changing World." *Journal of Applied Probability* 25 (1988): 287–298.
- Wigderson, Avi. "Knowledge, Creativity, and P versus NP." <http://www.math.ias.edu/~avi/PUBLICATIONS/MYPAPERS/AW09/AW09.pdf>, 2009.
- Wilkes, Maurice V. "Slave Memories and Dynamic Storage Allocation." *IEEE Transactions on Electronic Computers* 14 (1965): 270–271.
- Wright, J. W. "The Change-Making Problem." *Journal of the Association of Computing Machinery* 22 (1975): 125–128.
- Wulf, William Allan, ve Sally A. McKee. "Hitting the Memory Wall: Implications of the Obvious." *ACM SIGARCH Computer Architecture News* 23, no. 1 (1995): 20–24.
- Xu, Fei, ve Joshua B. Tenenbaum. "Word Learning as Bayesian Inference." *Psychological Review* 114 (2007): 245–272.
- Yang, Mark C. K. "Recognizing the Maximum of a Random Sequence Based on Relative Rank with Backward Solicitation." *Journal of Applied Probability* 11 (1974): 504–512.
- Yato, Takayuki, ve Takahiro Seta. "Complexity and Completeness of Finding Another Solution and Its Application to Puzzles." *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences* 86, no. 5 (2003): 1052–1060.
- Yngve, Victor H. "On Getting a Word in Edgewise." In *Chicago Linguistics Society, 6th Meeting*, 1970, 567–578.
- Zahniser, Rick. "Timeboxing for Top Team Performance." *Software Development* 3, no. 3 (1995): 34–38.
- Zapal, Warren M., Michael T. Snider, J. Donald Hill, Robert J. Fallat, Robert H. Bartlett, L. Henry Edmunds, Alan H. Morris, E. Converse Peirce, Arthur N. Thomas, Herbert J. Proctor, ve diğ erleri. "Extracorporeal Membrane Oxygenation in Severe Acute Respiratory Failure: A Randomized Prospective Study." *Journal of the American Medical Association* 242, no. 20 (1979): 2193–2196.
- Zelen, Marvin. "Play the Winner Rule and the Controlled Clinical Trial." *Journal of the American Statistical Association* 64, no. 325 (1969): 131–146.
- Zippel, Richard. "Probabilistic Algorithms for Sparse Polynomials." In *EURO-SAM'79 Proceedings of the International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation*. Londra: Springer, 1979, 216–226.

Teşekkür

İlk olarak aşığıda isimlerini belirttiğimiz, bizimle oturup çalışmalarını ve geniş bakış açılarını paylaşmak üzere zaman ayıran araştırmacı, uygulamacı ve uzmanlara teşekkür ederiz: Dave Ackley, Steve Albert, John Anderson, Jeff Atwood, Neil Bearden, Rik Belew, Donald Berry, Avrim Blum, Laura Carstensen, Nick Chater, Stuart Cheshire, Paras Chopra, Herbert Clark, Ruth Corbin, Robert X. Cringely, Peter Denning, Raymond Dong, Elizabeth Dupuis, Joseph Dwyer, David Estlund, Christina Fang, omas Ferguson, Jessica Flack, James Fogarty, Jean E. Fox Tree, Robert Frank, Stuart Geman, Jim Gettys, John Gittins, Alison Gopnik, Deborah Gordon, Michael Gottlieb, Steve Hanov, Andrew Harbison, Isaac Haxton, John Hennessy, Geoff Hinton, David Hirshliefer, Jordan Ho, Tony Hoare, Karmal Jain, Chris Jones, William Jones, Leslie Kaelbling, David Karger, Richard Karp, Scott Kirkpatrick, Byron Knoll, Con Kolivas, Michael Lee, Jan Karel Lenstra, Paul Lynch, Preston McAfee, Jay McClelland, Laura Albert McLay, Paul Milgrom, Anthony Miranda, Michael Mitzenmacher, Rosemarie Nagel, Christof Neumann, Noam Nisan, Yukio Noguchi, Peter Norvig, Christos Papadimitriou, Meghan Peterson, Scott Plagenhoef,

Anita Pomerantz, Balaji Prabhakar, Kirk Pruhs, Amnon Rapoport, Ronald Rivest, Ruth Rosenholtz, Tim Roughgarden, Stuart Russell, Roma Shah, Donald Shoup, Steven Skiena, Dan Smith, Paul Smolensky, Mark Steyvers, Chris Stucchio, Milind Tambe, Robert Tarjan, George Thorpe, Jackson Tolins, Michael Trick, Hal Varian, James Ware, Longhair Warrior, Steve Whittaker, Avi Wigderson, Jacob Wobbrock, Jason Wolfe, ve Peter Zijlstra.

King County Halk Kütüphanesi, Seattle Halk Kütüphanesi ve Berkeley Üniversitesi Kütüphanelerine arka plandaki çalışmalarına erişmemize izin verdikleri için teşekkür ederiz.

Aralarında Sharon Goetz, Mike Jones, Tevye Krynski, Elif Kuş, Falk Lieder, Steven A. Lippman, Philip Maughan, Sam McKenzie, Harro Ranter, Darryl A. Seale, Stephen Stigler, Kevin Omsen, Peter Todd, Sara M. Watson ve Sheldon Zedeck'in olduğu yazıştığımız ve bilmeye değer araştırma yönlerini bize işaret eden kişilere teşekkürlerimizi sunarız.

Değerli görüşlerini aldığımız görüşmeler için aşağıdaki kişilere ve bu listede olmayanlara da teşekkür ederiz: Elliot Aguilar, Ben Backus, Liat Berdugo, Dave Blei, Ben Blum, Joe Damato, Eva de Valk, Emily Drury, Peter Eckersley, Jesse Farmer, Alan Fineberg, Chrix Finne, Lucas Foglia, John Gaunt, Lee Gilman, Martin Glazier, Adam Goldstein, Sarah Greenleaf, Gra Haley, Ben Hjertmann, Greg Jensen, Henry Kaplan, Sharmin Karim, Falk Lieder, Paul Linke, Rose Linke, Tania Lombrozo, Brandon Martin-Anderson, Sam McKenzie, Elon Musk, Columbia Üniversitesindeki Neuwright grubuna, Hannah Newman, Abe Othman, Sue Penney, Dillon Plunkett, Kristin Pollock, Diego Pontoriero, Avi Press, Matt Richards, Annie Roach, Felicity Rose, Anders Sandberg, Claire Schreiber, Gayle ve Rick Shanley, Max Shron, Charly Simpson, Najeeb Tarazi, Josh Tenenbaum, Peter Todd, Peter van Wessel, Shawn Wen, Jered Wierzbicki, Maja Wilson, ve Kristen Young.

Bu çalışmamızı mümkün kılan açık kaynak kodlu güzel yazılımların bazıları için ilk olarak Git, LaTeX, TeXShop ve Text-Mate'e teşekkürler.

Çeşitli alanlardaki yetenekleri ve çabalarını bize borç verenlere ve özellikle kitap ile arşiv çalışmaları için Lindsey Baggette, David Bourgin ve Tania Lombrozo'ya teşekkürler.

Darwin'in harika günlüğünün sayfasını basma izni için Cambridge Üniversite Kütüphanesine ve yardımları için Michael Langan'a teşekkür ederiz.

Henry Young'a keskin portre için teşekkürler.

Tüm çalışma boyunca taslakları okuyan ve değeri ölçülemez geri dönüşleri için Ben Blum, Vint Cerf, Elizabeth Christian, Randy Christian, Peter Denning, Peter Eckersley, Chrix Finne, Rick Fletcher, Adam Goldstein, Alison Gopnik, Sarah Greenleaf, Gra Haley, Greg Jensen, Charles Kemp, Raphael Lee, Rose Linke, Tania Lombrozo, Rebekah Otto, Diego Pontoriero, Daniel Reichman, Matt Richards, Phil Richerme, Melissa Riess James, Katia Savchuk, Sameer Shari, Janet Silver, Najeeb Tarazi ve Kevin Thomson'a teşekkürler.

Ajansımız Max Brockman'a ve Brockman şirketindekilere işlerindeki zekâ ve heyecanları için teşekkürler.

Editörümüz Grigory Tovbis'e ve Henry Holt'taki ekibe yolculuk bilmez, şevkli ve zeki çalışmalarıyla bu kitabı olabileceği en iyi şekle getirdikleri ve dünyayla tanıştırdıkları için teşekkürler.

Çeşitli defalar çocuk bakımını üstlenen Tania Lombrozo, Viviana Lombrozo, Enrique Lombrozo, Judy Griffiths, Rod Griffiths ve Julieth Moreno'ya ve kitap çalışmalarının zaman planlama kısıtlarına katlanırken gösterdikleri sabır ve kibarlık nedeniyle Lombrozo Griffiths ailesi ile Berkeley Üniversitesi Bilişim Laboratuvarına teşekkür ederiz.

Doğrudan ya da dolaylı yardımlarını teklif etmiş olan çeşitli kuruluşlara teşekkür ederiz. Berkeley Üniversitesi, misafir akademisyen programında iki senelik çalışma için Algı ve Beyin Bilimleri Enstitüsüne ve sürekli desteği için psikoloji bölümüne teşekkürler. Philadelphia Açık Kütüphanesine, Berkeley Kütüphanesine, Mekanik Enstitüsü Kütüphanesine ve San Francisco Halk Kütüphanesine mekân ve zaman tahsislerinden ötürü teşekkürler. Pennysylvania Üniversitesi Fisher Güzel Sanatlar Kütüphanesine günler boyunca öğrenci olmayan birini ağırladıkları için teşekkürler. Corporation of Yaddo, the MacDowell Colony ve Port Townsend Writers' Conference kuruluşlarına güzel, ilham verici ve verimli ev sahiplikleri için teşekkürler. Bilişsel Bilim Topluluğuna ve Yapay Zekâ Geliştirme Birliğine yıllık konferanslarına katılma teklifleri için teşekkürler. Burada kişiler arası, disiplinler arası ve yarı küreler arası ilişkiler kurulabilmektedir. San Francisco'da müzik olmadan kahve alabildiğimiz tek yer olarak bildiğimiz Borderlands Cafe'ye teşekkürler.

Rose Linke'ye ve Tania Lombrozo'ya çok teşekkürler; okuyucularımız, eşlerimiz, destekçilerimiz, ilham kaynaklarımız ve her şeyimiz oldukları için.

Yazarlar Hakkında

Brian Christian bir *Wall Street Journal* yazarıdır ve *New Yorker*'da yılın kitabı olan, 10 dile çevrilmiş *The Most Human Human* kitabının yazarıdır. Yazıları *The New Yorker*, *The Atlantic*, *Wired*, *The Wall Street Journal*, *The Guardian*, *The Paris Review* ve *Cognitive Science* gibi bilimsel dergilerde yayınlanmıştır. San Francisco'da yaşamaktadır.

Tom Griffiths Berkeley Üniversitesi'nde psikoloji ve bilişsel bilim alanında öğretim elemanıdır ve üniversitenin Bilişsel Bilim Laboratuvarı'nın başındadır. Bilişsel psikolojiden kültürel evrime kadar değişen alanlarda 150'den fazla bilimsel yayın yapmış ve Ulusal Bilim Kuruluşu'ndan, Sloan Vakfı'ndan, Amerikan Psikoloji Birliği'nden ve Psikonomik Topluluk'tan ödüller almıştır. Berkeley'de yaşamaktadır.

Yaşamımızın tamamı, belirli bir sorun grubuna yol açan mekân ve zaman kısıtları ile sınırlandırılmıştır. Bir günde ya da ömrümüz boyunca ne yapmalı ya da ne yapmamalıyız? Ne kadar karışıklığı kabul etmeliyiz? Bunlar insanlar açısından içinden çıkılmaz durumlara benziyor olabilirler fakat öyle değildir: Bilgisayarlar da aynı kısıtlamalarla karşı karşıyalar, bu nedenle bilgisayar bilimciler onlarca yıldır bu tür sorunların farklı versiyonlarıyla uğraşmaktadır. Ve buldukları çözümlerin bize öğreteceği çok ama çok şey var.

Ünlü yazar Brian Christian ve bilişsel bilim uzmanı Tom Griffiths disiplinlerarası bu çalışmasında, bilgisayarların kullandığı algoritmaların insanlığın birçok sorununu nasıl çözebileceğini göz kamaştırıcı biçimde okuyuculara sunuyor. Daha iyi sezgilere nasıl sahip olunacağını, işleri ne zaman bitirmemiz gerektiğini, yorucu ve sıkıntılı seçimlerle nasıl başa çıkacağımızı ve başkalarıyla en iyi nasıl ilişki kuracağımızı açıklıyorlar. **Evlilik için en doğru kişiyi bulmaktan** park yeri seçimine, kişinin e-posta gelen kutusunu düzenlemesinden belleğin işleyişini anlamaya kadar bu kitap, bilgisayar biliminin bilgeliğini insan hayatı için çok önemli stratejilere dönüştürüyor.

"Bu kitap kesinlikle mest edici... Genç matematik öğrencilerinden sıkça duyduğunuz 'Neden' ki? Bunu gerçek hayatta asla kullanmayacağım!' argümanına karşı mükemmel bir panzehir. İster oyun teorisinin **Yüzde 37 Kuralı** olsun, isterse zihin-büküm olasılıklarının nispeten sade anlatımı, tüm iş burada sunulduğu kadar hem eğlenceli hem de pratik."

—Popular Science

"Zorlayıcı ve eğlenceli. Bu kitap; zaman, mekân ve çaba kullanımında daha verimli olmanızı sağlayacak pratik tavsiyelerle dolu. Ve bu, bilgisayar bilimi ve insan zihninin işleyişi üzerine büyüleyici bir araştırmadır. Yapılacaklar listenizi optimize etmek, dolabınızı organize etmek veya insan hafızasını anlamak isteyenler için harika bir kitap."

—Charles Duhigg, *Alışkanlıkların Gücü* kitabının yazarı

"Hesaplama modellerini insan psikolojisi ile birleştiren bir kitabı uzun süredir bekliyordum. Christian ve Griffiths tüm beklentilerimin üzerinde bir başarı yakaladı. Bu, dünyamızı işleten bilgisayar bilgisini -ve daha da önemlisi, hayatımız için ne anlam ifade ettiğini- herkesin anlayabileceği şekilde anlatan muhteşem bir kitap."

—David Eagleman, *Incognito: Beynin Gizli Hayatı* kitabının yazarı



www.buzdagiyaivevi.com